

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2009

Kateřina Kudová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Studijní program: Textilní inženýrství

Studijní obor: Textilní materiálové inženýrství

Katedra netkaných textilií

Porozita nanovláknenných vrstev a její vliv na kapalinovou filtraci

Relation between porosity and liquid filtration properties of nanofiber layers

Autor: Kateřina Kudová, Bc.

Vedoucí diplomové práce: Hrůza Jakub, Ing. Ph.D.

Počet stran textu: 67

Počet obrázků: 19

Počet tabulek: 10

Počet příloh: 1

V Liberci 25.5.2009

Zadání práce

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 25.5.2009

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jakobovi Hrůzovi Ph.D. za jeho zájem, ochotu, odborné rady a připomínky. Děkuji své rodině za podporu v průběhu celého mého studia.

Anotace

Tato práce pojednává o vlastnostech nanovláknenných vrstev, zejména o porozitě a jejím vlivu na kapalinovou filtraci. V první řadě jsou charakterizována nanovláknena a nanostruktury, jejich společné znaky, vlastnosti, technologie výroby a možné použití v mnoha oblastech (kap.2). Následuje popis procesu separace, vysvětlení jeho základních pojmů, zejména pojmu filtrace a jejích nástrojů (kap.3). Dále se zabývám možnými způsoby zjištění velikosti pórů vláknenných vrstev, kde vycházím z rovnic a vztahů odvozených profesorem Bohuslavem Neckářem na Katedře textilních technologií, Fakulty textilní, TUL (kap.4).

Dále je blíže popsán proces samotné filtrace včetně rozboru tvaru a velikosti filtrovaných částic a prostředí filtrované kapaliny (kap.5). Následující kapitola pojednává o průchodu kapaliny porézním prostředím, tedy filtrem, je zde zmíněn D'Arcyho zákon, který se pokouší tento jev popsat (kap.6). Dostáváme se k experimentu (kap.7), který jsme prováděli s předpokladem, že snížíme porozitu nanovláknenných vrstev, když samotná vrstva bude tvořena několika nánosy. Nejprve se pokoušíme vyrobit vhodné nanovláknenné vrstvy, u kterých následně měříme a porovnáváme jejich filtrační vlastnosti. Tím se dostáváme k závěru práce, kde zvažujeme, do jaké míry se splnily naše předpoklady, zda-li byly experimenty úspěšné či nikoliv a jakých výsledků jsme dosáhli.

Anotation

This thesis treat of characteristics of nanofiber layers, especially of porosity and relation between porosity and liquid filtration properties of nanofiber layers. At first we describe characteristics of nanofibers and nanostructures, collective signs, properties, production technology and applications in many parts of use (chap.2). The next description is about separation process and description of basic notions such filtration process and his equipment (chap.3). The next chapter is about ways of calculation the size of pore in fiber layer. Relations and equations used in this chapter are derived from professor Bohuslav Neckář in Department of Textile technologies, Fakulty of textile, TUL (chap.4).

Than we describe filtration process, size of filtered particles, the shape and cross section of particles and media of filtered liquid (chap.5). Characteristics of the filtered liquid and porous filter is defined by D'Arcy's low (chap.6). In next chapter we get to experimental part of thesis, there is presumption that the layer, made from a few deposits, will have better filtration properties than the layer, made from only one deposit (chap.7). At first we try to make suitable nanofiber layers and than we measure their filtration properties and confront it. We get to the finish, where we confront the presumption, results and effect of this thesis.

Klíčová slova:

Nanovlákná

Nanovrstvy

Porozita

Velikost pórů

Separace

Kapalinová filtrace

Key words:

Nanofibers

Nanolayer

Porosity

Size of pore

Separation process

Liquid filtration

Seznam symbolů a zkratek

a	konstanta zvolená z výsledků experimentů prof. Neckářem
A_p	povrch pórů [m^2]
D	průměr vlákna [m]
d_p	ekvivalentní průměr póru [m]
d_{p*}	průměr konvenčního póru [m]
Δp	rozdíl tlaku před a po průchodu filtrem [Pa]
dz	tloušťka porézního prostředku (filtru) [m]
E	efektivita filtru [%]
E_s	efektivita filtru [%]
F_p	síla daná tlakem vytlačujícím kapalinu z póru [N]
F_γ	síla daná povrchovým napětím kapaliny [N]
G_1	podíl částic prošlých filtrem [%]
G_2	celkové množství částic
J	jímavost filtru
k	permeabilita
k	konstanta (pro póry s konstantní délkou $k = 1$)
l	délka vlákna [m]
L	tloušťka filtračního koláče [m^2/m^3]
L_p	souhrnná délka pórů [m]
L_{p*}	délka konvenčního póru [m]
m	množství částic nanesených na filtr [kg]
P	měrný povrch vlákna [m^2/kg]
p	vnější tlak vytěsňující kapalinu z póru [Pa]
p_1	tlak filtrátu před průchodem filtrem [Pa]
p_2	tlak filtrátu po průchodu filtrem [Pa]
p_p	obvod průřezu póru [m]
p_{p*}	obvod průřezu konvenčního póru [m]
Δp	rozdíl tlaku před filtrem a po průchodu filtrem [Pa]
q	tvarový faktor
q_p	tvarový faktor pórů
q_{p*}	tvarový faktor konvenčního póru
Re	Reynoldsovo číslo

S	plocha póru [m^2]
S_0	specifický obsah povrchu filtrovaných částic [m^2]
s_p	plocha průřezu póru [m^2]
s_{p^*}	plocha průřezu konvenčního [m^2]
u	rychlost [m/s]
V	objem vláken [m^3]
V_c	celkový objem vrstvy [m^3]
V_p	celkový objem pórů [m^3]
x	velikost obtékaných částic [m]
ε	porozita filtru
γ	povrchové napětí kapaliny
γ_p	objemový povrch pórů
μ	zaplnění filtru
π	Ludolfovo číslo
ρ	měrná hmotnost vlákna [kg/m^3]
ρ_k	hustota kapaliny [kg/m^3]
χ_{sv}	střední průměr částic [m]
ζ	zeta potenciál
ψ	porózita [%]

Obsah

1	Úvod	14
2	Nanovláknna.....	15
2.1	Nanomateriály	15
2.2	Vlastnosti nanovláken	16
2.2.1	Měrný povrch nanovláken.....	16
2.3	Technologie Nanospider	17
2.4	Možné aplikace nanomateriálů.....	19
2.4.1	Kompozitní materiály	19
2.4.2	Bio medicína	19
2.4.3	Membránové separační procesy	19
2.4.4	Kosmetický průmysl	20
2.4.5	Použití ve vesmíru	20
2.4.6	Ekologie	20
2.4.7	Nanoelektrické aplikace	21
2.4.8	Strojírenství	21
2.4.9	Stavebnictví	21
3	Proces separace	22
3.1	Základní pojmy:	22
3.2	Dělení filtrace podle velikosti filtrovaných částic.....	23
3.3	Druhy filtrace podle mechanismů:	23
3.4	Modely filtrace	26
3.5	Schéma procesu separace částic z kapalného prostředí.....	28
3.5.1	Předúprava.....	29
3.5.2	Předfiltrace	29
3.5.3	Filtrace pevných částic	29
3.5.4	Následná úprava	30
3.6	Hlavní parametry filtrace	31
3.7	Hlavní filtrační vlastnosti	32
3.8	Druhy filtrů.....	33
4	Velikosti pórů	34
4.1	Výpočet celkového objemu pórů:	36
4.2	Výpočet velikosti jednotlivých pórů	36
4.2.1	Konvenční póry	38
4.2.2	Vztah vláken a pórů.....	39
4.2.3	Zobecněné póry	40
5	Popis procesu filtrace	41
5.1	Tvar částic	41
5.2	Velikost částic	42
5.3	Prostředí filtrovaného média	44
6	Průchod kapaliny porézním prostředím – D´Arcyho zákon.....	45
6.1	D´Arcyho zákon	45
6.2	Permeabilita a specifický odpor	46
6.2.1	Koženého a Carmanova rovnice	47
7	Experiment	48
7.1	Úvod.....	48
7.2	Experiment, část 1: vliv počtu vrstev na filtrační vlastnosti	48
7.2.1	Popis experimentu	49
7.2.2	Parametry	50

7.2.3	Výsledky.....	57
7.2.4	Diskuze.....	60
7.3	Experiment, část 2, srovnání naměřených a vypočítaných hodnot velikostí pórů a filtrace 61	
7.3.1	Výpočet velikosti pórů nanovrstev podle Neckáře	61
7.3.2	Diskuze.....	62
7.4	Experiment, Část 3, vrstvy s aktivními látkami	64
7.4.1	Diskuze.....	64
8	Závěr.....	65
9	Použitá literatura	66

1 Úvod

Cílem této práce bylo zjistit vliv porózy nanovláknenných materiálů na jejich filtrační vlastnosti, získat základní poznatky o kapalinové filtraci, vyrobit vlákenné vrstvy z nanovláken a otestovat jejich filtrační vlastnosti. Předpokladem bylo, že nanovláknenná vrstva vyrobená opakovaným nanášením několika nánosů na sebe bude mít při stejné plošné hmotnosti lepší filtrační vlastnosti než vrstva vytvořená jedním “silným” nánosem. Pokusy o vytvoření takové nanovláknenné vrstvy a její měření jsou včetně výsledků zaznamenány v kapitole 7.

V nejjednodušším pojetí lze filtraci rozdělit na dvě fáze, filtraci kapalin a filtraci pevných látek. Tekutina suspenze filtrem protéká, zatímco pevné částice jsou filtrem zachyceny. Filtrace tvoří vždy jádro procesu, ale neméně důležité jsou i technologické postupy a potřebné nástroje.

Filtrace je využívána v mnoha procesech pro dosažení jednoho či více cílů, kterými je:

- separace pevné fáze, vyřazení kapalin
- separace kapalin, vyřazení pevných látek
- obnova kapalných i pevných látek
- žádná fáze není separována, kapalná fáze je čištěna prioritně (obdoba ochrany proti znečištění vody)

Při výběru nástrojů pro realizaci filtračního procesu je důležité, zda separace bude probíhat souvisle nebo nesouvisle[16].

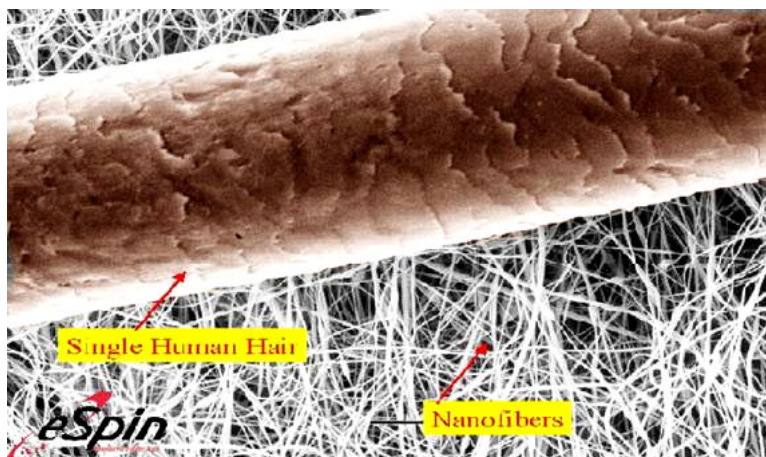
2 Nanovlákná

2.1 Nanomateriály

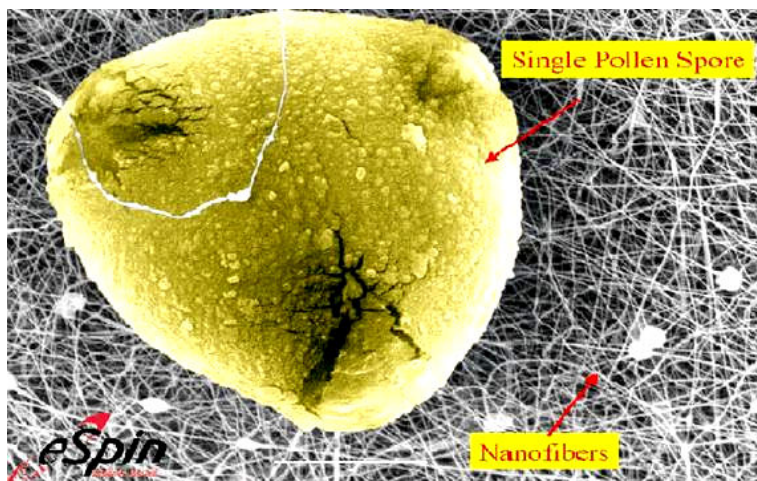
Nanomateriály se vyznačují následujícími společnými znaky:

- stavebními jednotkami jsou nanočástice s definovanými vlastnostmi - velikost, tvar, atomová struktura, krystalinita, homogenní/heterogenní složení a chemické složení. Rozměry jsou limitovány v oblasti od molekul k pevným částicím menším než 100 nm. Vlivem malých rozměrů v některých případech počet povrchových atomů převyšuje počet atomů ve vnitřním objemu
- tyto stavební jednotky jsou uspořádané v makroskopických multi-klastrových materiálech s velmi různorodým topologickým pořádkem. Chemicky identické částice mohou být těsně uspořádány a kompaktovány za vzniku hranic zrn. Částice mohou být oddělené nebo spojené koalescencí nebo podložkou a mohou vytvářet nanodrátky, nanotrubice, nanokompozity, keramické nebo jiné tenké filmy nebo vrstvy
- stavební jednotky a jejich topologie mohou sloužit pro vytváření rozměrnějších materiálů vhodných pro technické aplikace

Nanomateriály (nanostrukturní materiály) jsou ty, jejichž nové vlastnosti jsou určeny charakteristickými znaky (částice, klastry, dutiny) o rozměrech mezi 1-100 nm, při nejmenším ve dvou rozměrech (převzato ze zdroje č.[10]). Na Obr.2.1 je znázorněn jeden lidský vlas v porovnání se spleť nanovláken a Obr.2.2 ukazuje spleť nanovláken v porovnání se zrnkem pylu (převzato ze zdroje č.[5]).



Obr.2.1: Lidský vlas v porovnání s nanovláknky



Obr.2.2: Zrnko pylu v porovnání s nanovlákný

2.2 Vlastnosti nanovláken

Díky extrémně velkému měrnému povrchu mají nanovlákná specifické vlastnosti. Velký měrný povrch je to nejpodstatnější, čím se odlišují nanovlákná od běžně používaných vláken. Další vlastnosti jako nízká hustota, velký objem pórů nebo malé velikosti průřezů pórů dělají z nanovláken vhodný materiál pro rozsáhlé použití nejen ve filtračních aplikacích [5]. Způsoby výpočtu velikosti pórů jsou detailně popsány v kap.4 Velikost pórů.

2.2.1 Měrný povrch nanovláken

Měrným povrchem P [m^2/kg] se rozumí plocha vlákna vztažená na jednotku hmotnosti. Považujeme-li vlákno za váleček, pak můžeme zapsat, že:

$$P = \frac{2\pi \cdot D \cdot \frac{2}{4} + 2\pi \cdot D \cdot l}{\left(\pi \cdot D \cdot \frac{2}{4}\right) \cdot l \cdot \rho}, \quad (2.1)$$

kde D je průměr vlákna, π je Ludolfovo číslo, l je délka vlákna a ρ je měrná hmotnost vlákna. Zanedbáme-li při výpočtu plochu kruhové podstavy válce a výraz upravíme, získáme zjednodušený vztah [7]:

$$P = \frac{4}{\rho \cdot D} \quad (2.2)$$

Vezmeme-li v úvahu, že nanovlákná mají průměr 50 – 500 nm a měrná hmotnost polyuretanu, ze kterého jsou v našem experimentu vlákna vyrobená, je $1200\text{kg}/\text{m}^3$, pak se měrný povrch nanovláken může pohybovat v rozmezí $6000 - 66000\text{m}^2/\text{kg}$, což je **6 – 66m²/g**.

2.3 Technologie Nanospider

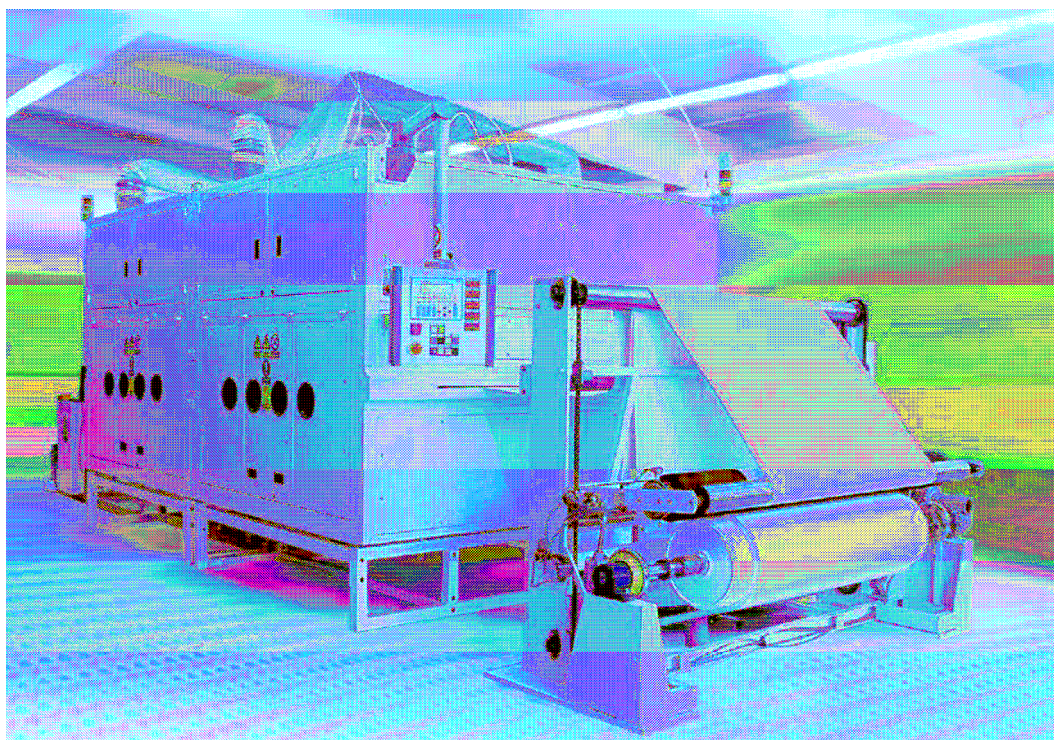
Tato technologie umožňuje průmyslově vyrábět nanovlákná o průměru 50–500 nm. Tato vlákna nejsou viditelná pod běžnými mikroskopy, jejich průměr je menší než vlnová délka světla. Několik posledních let věnují vědci na celém světě mimořádnou pozornost nanovláknům a široké oblasti jejich aplikací. O nanovlákněch odborníci předpokládají, že přinesou revoluci v medicíně, elektrotechnice, automobilovém průmyslu, kosmetice, energetice a dalších průmyslových sférách i službách. Někteří vědci přirovnávají nástup nanotechnologií k největším milníkům lidského vývoje. Hlavní příčinou, proč se zatím nepodařilo uvést nanovlákná do masové produkce, je složitost jejich výroby v průmyslovém měřítku. Pokusy o vytvoření nanovláken konala již v roce 1934 společnost Formalas.

Podstatně lepších výsledků však bylo dosaženo až o několik desítek let později, kdy vznikla technologie elektrospinningu (elektrostatického zvlákňování). V procesu elektrostatického zvlákňování se nejčastěji využívá stejnosměrného elektrostatického pole o vysoké intenzitě. Toto pole je tvořeno napětím mezi elektrodami, z nichž jedna je v podobě úzké kapiláry a druhá je např. v podobě disku, který je plochou stranou postavený proti vrcholu kapiláry. Kapilárou je vytlačován polymerní roztok. Protože je kapilára současně nabitá, dochází k přenosu náboje do roztoku polymeru. Na polymerní roztok, který se ocitne v ústí kapiláry, působí síla coulombovská - daná neseným nábojem a odstředivá - daná rotací kapiláry.

Síly způsobí energické vytažení hmoty roztoku směrem ke kolektoru. Dojde k vytvoření tzv. Taylorova kužele, což je mikroskopický prostorový útvar, který je výslednicí všech sil panujících na vrcholu trysky. Vytažené vlákno se pak na cestě ke kolektoru prodlužuje a ještě štěpí, přičemž dochází k obrovskému nárůstu povrchu, který je spojen s masivním odchodem rozpouštědel. Při vhodném uspořádání trysky a kolektoru a správné volbě rozpouštědel pak dopadají na kolektor již suchá vlákna, která mají submikronové průměry.

Princip elektrospinningu je znám již delší dobu, ale nikomu se nepodařilo jeho průmyslové využití s dostatečnou výrobní kapacitou. Situace se změnila v roce 2003, kdy Technická univerzita v Liberci zažádala o patent pro technologii průmyslové výroby nanovláknenného materiálu. Tato revoluční technologie byla nazvána Nanospider TM (Převzato ze zdroje č. [10]).

V principu se jedná o modifikovaný způsob přípravy nanovláken a nanovláknenných vrstev metodou elektrostatického zvlákňování roztoků polymerů. Na rozdíl od ostatních vědeckých postupů nepoužívá Nanospider TM (na Obr.2.3) pro tvorbu vláken žádných trysek ani kapilár. K tomu slouží rotující válec částečně ponořený v roztoku polymeru. Hlavní výhodou této technologie je výrazný vzrůst výrobní kapacity. Patent na novou technologii koupila od Technické univerzity společnost Elmarco, která s univerzitou i nadále spolupracuje. Společně zkonstruovaly řadu laboratorních zařízení určených pro výzkum a vývoj elektrospinningu, ale především pilotní linky pracující v šíři 1 a 1,6 m.



Obr.2.3: Průmyslová linka na výrobu nanovláken Nanospider line [1]

Společnost Elmarco poté vyprojektovala a vyrobila první laboratorní zařízení s názvem NS Lab a první průmyslovou linku na světě na výrobu netkané textilie z nanovláken NS Line. Tato linka dokáže vyrobit za rok víc než 10 mil m² této textilie.

V roce 2007 obdržela společnost Elmarco světové ocenění Nano50™ v kategorii Produkt, když vyrobila filtr s názvem NANOSPIDER Antimicrobe Web™, sloužící k odstraňování fyzikálních a biologických nečistot z vdechovaného nebo vydechovaného vzduchu, který umí zachytit více než 99,9 % virů a bakterií (Převzato ze zdroje č. [10]).

Přes tyto pokroky lze současnou úroveň poznatků, postupů a technologií v oblasti nanotechnologií přirovnat k situaci v elektronice, výpočetní technice a telekomunikacích koncem čtyřicátých a na začátku padesátých let minulého století. Nanostrukturami, které v současné době známe, jsou např. uhlíkové nanotrubičky, proteiny, DNA, jedno elektronové tranzistory, ale i prášky a vrstvy o rozměrech nanometrů [10].

2.4 Možné aplikace nanomateriálů

2.4.1 Kompozitní materiály

Tyto materiály jsou vždy složené ze dvou či více fází - matrice a výztuže, které se od sebe vzájemně výrazně liší svými vlastnostmi mechanickými, fyzikálními a chemickými. Projevuje se zde tzv. synergický efekt, což znamená, že vlastnosti výsledného kompozitního materiálu jako celku jsou lepší, než pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Aplikovat nanomateriály do kompozitních materiálů lze např. jako výztuže plastů či kovů, jako tepelné izolanty, bio kompozity v tkáňovém inženýrství a další.

2.4.2 Bio medicína

Materiály v rozměrech nanometrů jsou velmi vhodné pro aplikaci v tzv. bio medicíně a ve tkáňovém inženýrství. Díky svým rozměrům a struktuře jsou nanovlákna vhodným prostředím pro živočišné buňky, dají se použít pro tvorbu (pěstování) umělých orgánů jako jsou např. náhrady poškozených tkání, kloubů, krevních cév, pro léčbu rakoviny či popálenin, jako obvazy nebo dýchací roušky. Používají se i jako systémy cíleného doručení léčiv, kde se k aplikaci léku dají využít "nano" spreje, které obsahují v koloidním roztoku nanotechnologicky vyrobené vitamíny, rostlinné extrakty, minerály, aminokyseliny a další, které přitom neohrožují životní prostředí.

2.4.3 Membránové separační procesy

Nejnovější operací v těchto procesech je nanofiltrace (NF). Použití NF je v odsolování technologických kapalin, při výrobě čisté vody pro chemický, farmaceutický a potravinářský průmysl a při zpracování odpadních vod. NF membrány jsou polymerní, asymetrické, a kompozitní, mají vysokou účinnost. V poslední době se objevila membrána s keramickým nosičem s nanofiltrační funkcí, která má vyšší životnost než polymerní membrány.

2.4.4 Kosmetický průmysl

Čím dál větší pozornosti se dostává kosmetice obsahující nanočástice. V současnosti lze koupit výrobky na ochranu pokožky obsahující nanočástice. Jsou to nepatrné systémy pro přívod aktivních složek do intercelulárních oblastí, které se nanosou na pokožku a následně uvolňují vitamín E. Mezery vnější vrstvy pokožky totiž dosahují rozměrů asi 100 nm, a tak tyto nano systémy poskytují zatím nejlepší řešení pro transport a zacílení aktivních přísad v pokožce.

2.4.5 Použití ve vesmíru

Výzkumný tým NASA v Johnson Space Center se soustředí zejména na využití nových materiálů v konstrukci kosmických lodí, nanoelektronice a nanomedicíně, která bude zlepšovat podmínky astronautů v kosmickém prostoru. Oblast konstrukčních materiálů zahrnuje tři hlavní okruhy vývoje: kompozity, multifunkční materiály a tzv. samouzdravování (inteligentní materiály se schopností automaticky zacelovat mikrotrhliny ve struktuře).

Využity budou zejména žáruvzdorné materiály a nanotrubičky (nitridové nanotrubičky mají vynikající tepelnou odolnost a v budoucnu by se mohly využít zejména pro konstrukci senzorů, které musí odolávat velmi nepříznivým podmínkám v kosmickém prostoru).

Nanotechnologie zřejmě také umožní konstrukci vesmírného výtahu. Jedná se o velmi dlouhé lano (současný projekt počítá s délkou kolem 100 tisíc kilometrů), na kterém bude upevněn kosmický výtah. Hlavním přínosem by mělo být zlevnění dopravy do kosmu.

2.4.6 Ekologie

Nanotechnologie se vyznačuje technologickými postupy, které mají snahu o miniaturizaci elektronických obvodů a získání komplikovaných struktur daných hustotou integrace elektronických prvků. Pro obnovitelné zdroje energie se však požadavky soustřeďují spíše na tvorbu nanostruktur na velkých plochách. Týká se to především všech zařízení na přímé využití slunečního záření. Jedná se o fotovoltické články všech typů, ale také o nízкотеплотní kolektory a komponenty, které absorbují sluneční záření.

2.4.7 Nanoelektrické aplikace

Středem evropské společnosti se stává nanoelektronika. Jako obor může jednak pomoci vytvořit nová pracovní místa, ale může podpořit růst v mnoha průmyslových odvětvích, jako např. telekomunikace, multimédia, automobilový průmysl, při výrobě spotřebního zboží a v neposlední řadě v medicíně.

V optických nebo počítačových sítích (internet) se dají využít nanoantény, ve kterých nebudou data přenášena elektrickými signály, ale světelnými impulsy. Nanoantény se dají využít i u CD a DVD mechanik. S jejich pomocí mohou být navrženy efektivnější diody pro zápis dat na CD a DVD. Ty pak umožní číst a zapisovat menší kousky dat a tím i mnohonásobně zvýšit jejich hustotu, jejich kapacita tak radikálně vzroste.

Velkou budoucnost má využití nanotrubek jako součástí kompozitních materiálů, např. jako ohebné displeje vyzařující organické světlo. V současné době existují už digitální fotoaparáty s podobným displejem, který má pevný podklad, mezi jeho výhody patří to, že nepotřebuje prosvětlení, má větší pozorovací úhel a nižší spotřebu energie.

2.4.8 Strojírenství

V tomto odvětví mohou být nanomateriály využity např. jako super pevné materiály, super tvrdé povrchy s nízkým třením odolné proti poškrábání, samočisticí povrchy, oděru vzdorné laky, kompozitní materiály nebo obráběcí nástroje.

2.4.9 Stavebnictví

Ve stavebnictví lze nanomateriály použít např. jako izolační materiály nové generace, samo čistící fasádní nátěry nebo nepřilnavé obklady a další (kap.2.4 byla převzata ze zdroje č. [9]).

3 Proces separace

3.1 Základní pojmy:

Separace

Neboli separační proces je z fyzikálního hlediska proces, při kterém dochází k oddělování pevných částic od kapaliny či plynu, kde kapalina či plyn je označován jako médium, v němž jsou částice rozptýleny a jsou jeho proudem unášeny po dané trajektorii. Schéma procesu separace je uvedeno v kap.3.5 na Obr.3.2.

Filtrovaná kapalina

Nazývaná také jako filtrát nebo filtrační médium je kapalina, ve které jsou rozptýleny pevné filtrované částice a která je unáší po dané trajektorii směrem k filtru. Po průchodu filtrem zůstává část pevných částic ve filtrátu, ten se proto následně čistí, recykluje.

Filtry

Filtrem (někdy nazývaným jako filtrační prostředek) je propustný materiál, který dovoluje filtrované kapalině projít skrz, ale současně v sobě zadržuje filtrované částice. Složení filtračního prostředku je různé - od tkaných textilií a drátěných pletiv po plstě a jiné materiály, které mají spleťovou strukturu.

Jestliže filtrační prostředek nedovolí prostoupení tekutiny, zatímco zadrží filtrované částice, je vadný. Vhodný výběr filtru je rozhodující, správná volba záleží na mnoha faktorech. Těmi jsou - **schopnost zadržet částice (neboli účinnost filtru)**, aby nepronikly do struktury média, - **propustnost**, - **materiál**, ze kterého jsou filtry vyrobeny, např. polymer nebo kov, a **detaily konstrukce**, např. způsob propletení u tkaných prostředků.

Filtrace

Tato operace patří do procesu separace a je jeho nejdůležitější částí. V této operaci přichází filtrát k filtru, který zadrží určitý podíl pevných částic na svém povrchu (koláčová filtrace, vznik usazeniny - koláče) nebo uvnitř své struktury (hloubková filtrace). Část nezachycených částic prochází ve filtrátu skrze filtr.

3.2 Dělení filtrace podle velikosti filtrovaných částic

Mikrofiltrace

- částice jsou velikostí od 0,1 μm do 1 μm (např. pigmenty, bakterie, asbest), hnací silou tohoto procesu je rozdíl tlaku

Ultrafiltrace

- částice jsou velikostí od 3 nm do 0,1 μm (např. bílkoviny, viry, želatina, hnací silou tohoto procesu je rozdíl tlaku

Nanofiltrace

- zde se udává spíše rozmezí molekulárních hmotností filtrované látky a to přibližně od 200 g/mol do 15.000 g/mol, což odpovídá přibližně velikosti částic od 1 nm do 10 nm (např. barviva, pesticidy, herbicidy, cukry), hnací silou tohoto procesu je rozdíl tlaku [17]

3.3 Druhy filtrace podle mechanismů:

Reverzní osmóza

Molekulární hmotnost filtrované látky při reverzní osmóze je menší než 200 g/mol (např. ionty, soli), hnací silou tohoto procesu je rozdíl tlaku. Je to proces, který dovoluje transport rozpouštědla membránou, zatímco rozpuštěné soli a nízkomolekulární složky zachycuje. Proces je založen na aplikaci vnějšího tlaku ze strany koncentrovanějšího roztoku, což způsobí obrácení přirozeného jevu osmózy. Membrána musí být propustná pro rozpouštědlo, nikoliv však pro rozpuštěné látky. Osmotický tlak systému odpovídá ustálenému rozdílu hladin na obou stranách membrány. Pokud bude tlak na straně rozpuštěné látky větší než tlak osmotický, dojde k obrácení osmotického jevu a membránou budou určité složky rozpouštědla procházet a určité se budou zadržovat před ní. Dojde k rozdělení vstupního proudu na permeát a koncentrát.

Reverzní osmóza se využívá především k přípravě pitné vody například z vody mořské, ale také v akvaristice k úpravě vody pro některé druhy ryb. Aby bylo dosaženo ekonomicky výhodného provozu, pracuje se běžně při tlacích 5 - 8 Mpa [19].

Difusní dialýza

Znamená dělení iontů i nenabitých částic (např. krevní dialýza - čištění krve od metabolických škodlivin). Jedná se obecně o proces, při kterém jsou dva roztoky stejného složení, ale odlišné koncentrace odděleny iontově výměnnou membránou, která obsahuje kladně nebo záporně nabitá fixovaná iontová centra. Hnací silou procesu je rozdíl chemických potenciálů jednotlivých látek a iontů na obou stranách membrány.

Vlivem elektrostatických sil jsou však souhlasně nabité ionty roztoku membránou zadržovány, zatímco opačně nabité ionty membránou snadno procházejí (kation-výměnná membrána zadržuje anionty a propouští kationty a naopak)[12].

Elektrodialýza

Je dělení aniontů a kationtů (např. čištění síranových vod po těžbě uranu), hnací silou tohoto procesu je rozdíl elektrického potenciálu v elektrickém poli, Elektrodialýza (ED) patří do skupiny tzv. elektromembránových procesů, při kterých dochází k separaci záporně nabitých částic od kladně nabitých podle jejich migrace k příslušným elektrodám. K řízení této migrace slouží iontoměničové membrány, kterými je transportován jen určitý druh iontů, podle jejich náboje [8].

Hlubková filtrace

Pokud jsou částice menších rozměrů než je velikost pórů filtru, usazenina se dostane do vnitřní struktury filtru, některé velmi malé částice mohou projít skrz filtr a zůstat ve filtrátu.

Tento proces separace může vést k mechanickému nebo povrchově chemickému účinku a je uváděn jako „hlubková filtrace“ a je pracovním postupem např. hlubkových pískových filtrů a některých typů skládaných filtrů. V těchto aplikacích je koncentrace částic v tekutině obvykle velmi nízká, unášené částice procházejí relativně nerušeně póry filtru a následují trajektorii proudu tekutiny. Princip hlubkové filtrace je popsán na Obr.3.1(a).

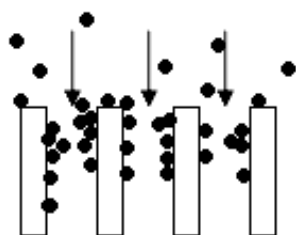
Koláčová neboli povrchová filtrace

Pokud jsou částice větší velikosti než je velikost pórů ve filtru, vytváří se na jeho povrchu usazenina známá pod názvem „filtrační koláč“- to je důvod, proč se tomuto způsobu filtrace říká „**koláčová filtrace**“. Koláčový filtr může být dále rozdělen podle působení odstředivých, tíhových nebo tlakových sil či použití ve vakuu [16].

V mikroskopickém měřítku je koláčové filtrace dosaženo kombinací dvou primárních mechanismů. Prvním je tzv. **kompletní blokování** (Obr.3.1(b)), což je prosévací proces, který nastává, když částice jsou větší než póry filtru. A druhým mechanismem je tzv. **přemostění** (Obr.3.1 (c)), které nastává, když částice menších rozměrů, než jsou póry filtru, formují filtrační koláč uvnitř filtru, to se děje obzvlášť při vysoké koncentraci částic v tekutině.

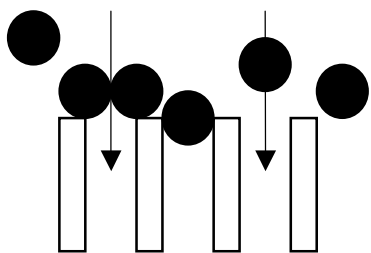
Pak několikere částice současně usilují o průchod skrz póry na povrchu filtru, což se jim nezdaří a vytvářejí „most“ přes vstupy pórů. Most je v podstatě oblouk upevněný průtokem filtrované kapaliny okolo pórů a jeho rozboření lze dosáhnout změnou rychlosti nebo směru průtoku [16].

a) Hlubková filtrace



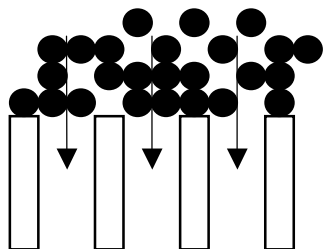
- velikost částic < velikost pórů
- nízká koncentrace částic
- zachycení částic je převážně uvnitř filtračního prostředí

b) Kompletní bloková filtrace



- velikost částic > velikost pórů
- nízká nebo střední koncentrace částic
- zachycení částic proséváním
- možné částečné přemostění

c) Filtrace přemostěním



- velikost částic < velikost pórů
- vysoká koncentrace částic
- zachycení částic na povrchu
- vznik stabilních a propustných mostů

(převzato ze zdroje[16])

Obr.3.1: Způsoby zadržení filtrovaných částic

3.4 Modely filtrace

Tzv. modely filtrace jsou odvozeny podle mechanismů popsaných na Obr.3.1, tyto zákony zkoumali Hermans a Bredée (1935), Gonsalves (1950), Grace (1956), Hermia (1982) a další. Jejich počátky pramenily z pravděpodobnostního modelování filtrace a z chování částic zachycených na povrchu filtru.

Extrémní situace je popsána v „**kompletním modelu o blokové filtraci**“. Vezmeme-li v úvahu filtr podobný tomu, které se používá k pročištění kapalin, bude jím list papíru nebo podobný porézní materiál či tenká vrstva filtru. Každá částice, která dosáhne povrchu filtru, se podílí na vytváření bloku, zábrany, což vede k zanášení pórů. To vede k předpokladu, že další částice nejsou vrstveny na ty, které se už na povrchu usadily. Jakmile je objem kalu filtrován, část povrchu filtru je zanesena, vytvoří se blok a tato část už dále neumožňuje průchod filtrátu.

„**Střední model o blokové filtraci**“ bere v úvahu, že částice, které dosáhnou povrchu filtru, zanesou póry, ale částice, které dorazí později, mohou spočinout na již usazených částicích. Jinými slovy, ne každá částice zanese pór, ale existuje pravděpodobnost, že tento případ může nastat.

Méně namáhavý proces vytváření zábrany - bloku je popsán v „**modelu o standardní blokové filtraci**“. Předpokládá se zde, že objem pórů klesá proporcionálně s produkcí filtrátu, dochází k vytváření nánosů na stěnách pórů a všechny póry jsou stejných průměrů a délek. Zmenšení objemů pórů je přímo úměrné zmenšení plochy průřezů pórů. V tomto případě se nevytváří filtrační koláč, ale částice jsou separovány díky zachycení uvnitř objemu filtrované kapaliny. Každé zachycení může vyplývat z difúzních, setrvačných nebo elektrostatických účinků, které způsobují, že se částice dostanou do kontaktu se stěnami pórů a jakmile dojde ke kontaktu, dá se předpokládat, že částice je separována. Množství nánosů či objemová jímavost nečistot je závislá na velikosti vnitřního povrchu ve filtru a na objemu pórů filtru. Je-li naplněna kapacita pórů, nezachycené částice jsou unášeny proudem a dochází ke znečištění filtrátu (převzato ze zdroje[16]).

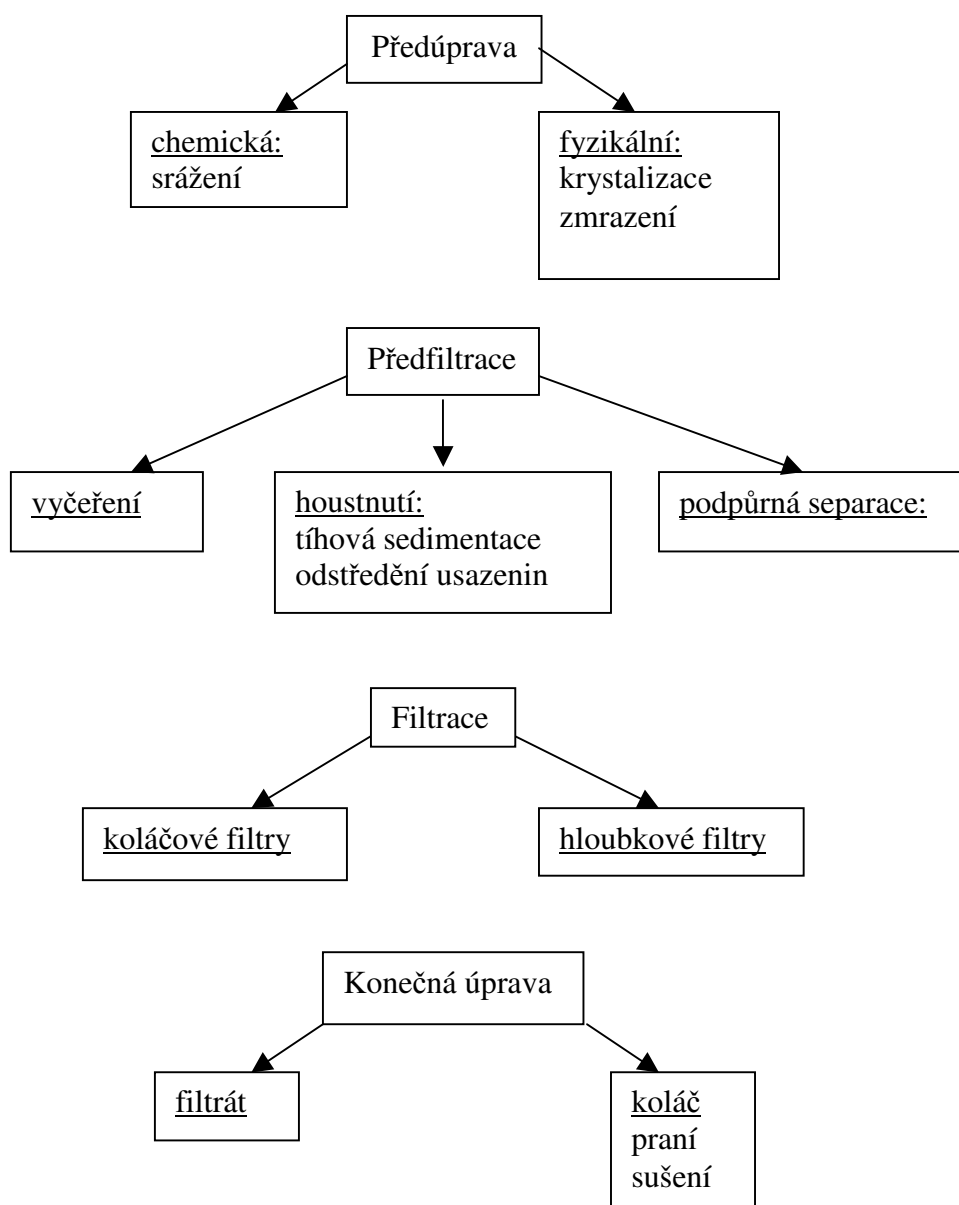
Mají-li být obnoveny pevné částice z filtru, je potřeba poměrně tlusté vrstvy filtračního koláče. To je popsáno v „**modelu o filtraci přemostěním**“ nebo „**modelu o koláčové filtraci**“. V tomto případě mohou být částice mírně menší nebo naopak větší velikosti než jsou velikosti pórů filtračního média. Účinnost lze zvýšit zvýšením koncentrace částic v kapalině.

Jak se jednotlivé částice přibližují k pórům filtru, je zde pravděpodobnost, že budou vytvářet most nebo oblouk přes rovinu pórů. Takové mosty nebo oblouky jsou stabilní, nenarušují směr toku kapaliny a dodatečně podporují tvorbu filtračního koláče.

Ačkoli jsou tyto tzv. zákony vhodné pro vizualizaci a porozumění mikroskopických jevů, které se mohou odehrávat na povrchu filtru, nepopisují fyziku uložení částic mimo prvních pár počátečních momentů filtrace. Z toho plyne, že jejich použití pro filtrační účely je omezené [16].

3.5 Schéma procesu separace částic z kapalného prostředí

Každý návrh separačního zařízení musí brát v úvahu všechny fáze, které jsou v procesu zahrnuty, tj. předúprava, koncentrace pevných částic, oddělení pevných částic a konečné úpravy. Tyto fáze obsahují široký výběr nástrojů a procesů viz Obr. 3.2.



Obr.3.2: Schéma filtračního procesu a nástrojů [16]

Jednotlivé filtrační operace (předúprava, předfiltrace, filtrace a konečná úprava) je možno podle potřeby vynechat či opakovat.

3.5.1 Předúprava

Je primárně užívána k usnadnění filtrace těžko filtrovatelného kalu. Kal může být těžko filtrovatelný z mnoha důvodů, například částice kalu mohou být velmi jemné a vést tak k ucpávání filtračního média (voda, vzduch) filtrem. Nebo díky nízké koncentraci částic kalu v médiu může dojít k vynesení částic na hladinu. Dalším důvodem jsou chemické vlastnosti částic, které mohou způsobit vytvoření gelu či nenávratné navázání na médium. Předúprava má obvykle za následek změnu vlastností suspendované hmoty, ať fyzikálními či chemickými prostředky nebo přidáváním pomocných prostředků pro filtraci za účelem zvýšení propustnosti nánosů kalu na filtru (tzv. "koláče"). Žádoucí je odstranit předúpravou jemné částice, které by mohly filtr ucpat a vést tak k neprůchodnosti filtrované kapaliny, či zvětšit částice pomocí srážení nebo krystalizace, které se tak stanou lépe filtrovatelnými. Některé předúpravy, zejména chemické, současně ovlivňují i vlastnosti kapaliny (média).

3.5.2 Předfiltrace

Během usazování pevných částic dochází k jejich houstnutí a současně k odstranění kapaliny způsobem gravitačním či odstředivým, ztěžuje se propustnost filtrem a dochází ke snadné formaci filtračního koláče. Pro větší efektivitu filtrace jsou do procesu jako alternativa zařazeny tzv. podpůrné separační techniky - magnetická, elektrická, akustická, zařazeny jednotlivě nebo jako kombinace. Tyto podpůrné separační techniky nejsou v praxi příliš běžné.

3.5.3 Filtrace pevných částic

Filtrace pevných částic od kapaliny je často uvažováno jako samostatný proces v technologickém postupu separace. Proces separace částic je citlivý na vývoj změn čištěné kapaliny. Změny podmínek během procesu separace částic často vedou ke změně průměrné velikosti částic, rozložení velikostí nebo tvaru částic, z nichž každá může mít velký vliv na vlastnosti separace a tudíž i na výkon filtru (převzato ze zdroje[16]).

3.5.4 Následná úprava

Zahrnuje zlepšení kvality filtrovaných částic nebo filtrátu. V případě filtrátu se jedná obvykle o opakované čištění, které může například zahrnovat cezení filtrátu přes jemné filtry za účelem odstranění jemných nečistot. Další čištění zahrnuje odstranění iontových a makromolekulárních částí pomocí např. reverzní osmózy.

Ekonomika a životaschopnost produkce je často ovlivněna množstvím kapaliny, filtrátu, vyloučeného v následné úpravě.

V případě filtrovaných částic zahrnuje jejich následná úprava vypírání rozpustných nečistot z pórů částic a odstranění přebytečného filtrátu z pórů částic za účelem snížení obsahu vlhkosti. To není nutné, pokud je filtrační koláč pouze lisován do určitých tvarů a část vlhkosti může zůstat uvnitř. Je-li požadován suchý produkt, pak je nutno použít sušicí zařízení, což je obvykle finální fáze odstraňování kapaliny z filtrovaných částic, které vede ke zvýšení nákladů.[16].

3.6 Hlavní parametry filtrace

Jedná se o proměnné parametry, které lze v procesu separace ovlivňovat, upravovat a měnit a které ve výsledku ovlivňují konečné vlastnosti celého procesu. Jsou jimi:

A. Parametry filtračního materiálu:

- plocha filtru
- tloušťka filtru
- plošná a objemová hmotnost filtru
- stejnoměrnost materiálu
- materiál a jeho parametry (objemová hmotnost, elektrická vodivost, odolnost vůči negativním vlivům atd.)
- parametry vláken (průměr, tvar, jemnost, orientace v prostoru atd.)

B. Parametry filtrovaných částic

- velikost částic disperzního podílu
- distribuce velikosti částic disperzního podílu
- koncentrace částic
- tvar a povrch částic
- objemová hmotnost částic
- elektrické vlastnosti

C. Parametry procesu filtrace

- rychlost náletu částic na filtr
- viskozita protékajícího média
- teplota, tlak, vlhkost [3]

3.7 Hlavní filtrační vlastnosti

Tyto vlastnosti jsou určující pro celý proces separace, lze je ovlivnit právě proměnnými parametry (uvedené v předchozí kap.3.6). Jsou jimi:

A. Efektivita = odlučivost částic

$$E = 1 - [G_1/G_2] (\%) , \quad (3.1)$$

kde $P = G_1/G_2$ je značen jako průnik, G_1 je množství disperzního podílu za filtrem, G_2 je celkové množství disperzního podílu (někdy se uvádí množství disperzního podílu před filtrem). V některých případech se efektivita zjišťuje nepřímo.

B. Tlakový spád:

$$\Delta p = p_1 - p_2 (\text{Pa}) , \quad (3.2)$$

kde p_1 je tlak filtrátu před průchodem filtrem, p_2 je tlak filtrátu po průchodu filtrem a Δp je rozdíl těchto tlaků.

C. Životnost filtru

Stanovení, kdy je třeba filtr vyměnit, pro jednorázové filtry je dána množstvím prachu, které je schopen pojmout do chvíle, kdy je tlaková ztráta příliš vysoká. Pro filtry s čištěním je dána intervaly mezi čištěním a jejich počtem - lze vyjádřit např. jímavostí filtru:

$$J = E_s \cdot m , \quad (3.3)$$

kde J značí jímavost, E_s je efektivita filtru a m je množství částic nanesených na filtr.

D. Odolnost vůči vnějším vlivům:

- mechanickým
- chemickým
- teplotním
- kombinacím

E. Další vlastnosti související s filtrací:

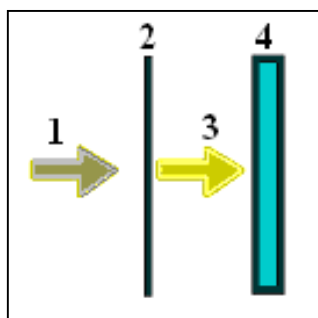
- prodyšnost: kolik tekutiny projde skrz 1 m² filtru za 1 minutu při definovaném tlakovém spádu (obvykle 196 Pa), jednotky: (l/m²/min)
- pórovitost: velikost póru určená obvykle střední, či maximální hodnotou, nebo distribucí velikostí (převzato ze zdroje č. [3])

3.8 Druhy filtrů

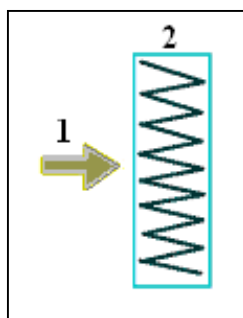
1. podle typu filtrace: koláčové
hloubkové

2. podle tvaru filtru:

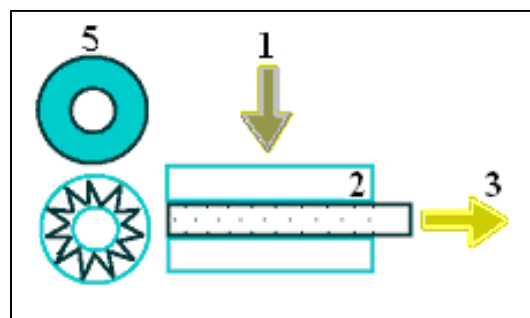
koláčové



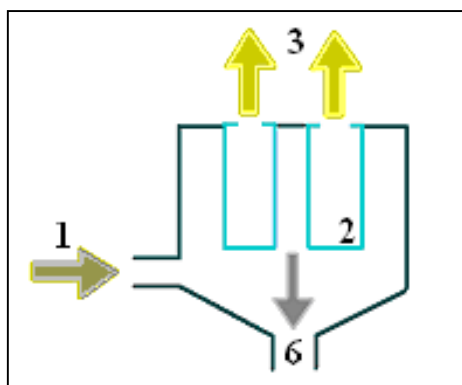
skládané



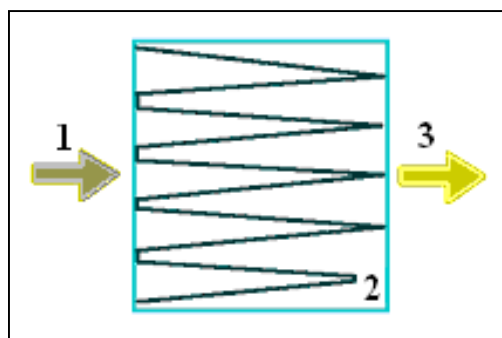
svíčkové



hadicové



kapsové



Obr.3.3: Druhy filtrů [3]

Popis jednotlivých částí obrázků:

- 1 Filtrované médium
- 2 Filtr
- 3 Filtrované médium po průchodu filtrem
- 4 Pomocný filtr
- 5 Průřez svíčkovým filtrem
- 6 Odloučené částice

4 Velikosti pórů

Póry mohou zaujímat nejrůznější tvary jako např. skuliny, štěrby či kanálky. Jejich tvar se odvíjí od tvaru průřezů vláken, z nichž je daná vlákenná vrstva tvořena. V našem případě tvoří vlákennou vrstvu polyuretanová nanovlákna, u kterých můžeme předpokládat, že jejich průřez bude velice blízký kruhovému. Velikost pórů závisí na zaplnění μ vlákny. Málo zaplněná vrstva bude obsahovat velké množství pórů a naopak vrstva s vysokým procentem zaplnění bude málo porézní. Výpočet zaplnění μ :

$$\mu = \frac{V}{V_c}, \quad (4.1.1)$$

kde V je objem vláken a V_c je celkový objem vrstvy.

Pro určení velikosti pórů ve vlákenných vrstvách se používají experimentální metody[11]:

A. Přímé metody:

a. Obrazová analýza

Je programový systém vyvinutý pro pořizování a ukládání obrazů, pro interaktivní měření geometrických vlastností vláken, přízí a plošných textilií nebo jiných netextilních materiálů. Systém umožňuje archivování rozsáhlých obrazových sekvencí a jejich zpracování. Systémem pro vytvoření obrazové analýzy je např. tzv. Lucia (Obr.4.1), která je složena z počítače se softwarem Lucia, kamery, mikroskopu a makroskopu. Použití je např. pro měření jemnosti, hustoty, délky nebo měrného povrchu vláken, určování jejich průřezů, pro mikroskopický pohled na strukturu plošné textilie a další. Nadstandardním použitím je např. komplexní vyhodnocování průřezů přízí, jejich chlupatosti nebo analýza povrchových struktur textilií [6].



Obr.4.1: Programový systém Lucia

Přímé metody určení velikosti pórů nelze u nanovláknenných materiálů s dostatečnou přesností použít, tyto materiály se vyznačují trojrozměrnou strukturou a dvojrozměrný obraz znázorněných pórů mezi vlákny může být značně odlišný od skutečnosti, protože neukazuje opravdovou hloubku jednotlivých pórů a dochází i ke zkreslení tvaru a velikosti plochy průřezů pórů díky velmi spletené struktuře nanovláknenných vrstev (viz. Příloha 1).

B. Nepřímé metody

b. Kapilární efekty:

Rtuťová porozimetrie

Souhrnně lze říci, že metoda rtuťové porozimetrie patří mezi rychlé a poměrně jednoduché metody sloužící k charakterizaci struktury pevných porézních materiálů a stanovení rozložení pórů v oblasti přechodných pórů (póry o poloměru 2 – 30 nm). Rtuťová porozimetrie je založena na jevu kapilární deprese projevující se tím, že při ponoření pevné porézní látky do rtuti, která ji nesmáčí (tj. úhel smáčení je větší než 90°), může rtuť vniknout do jejich pórů pouze účinkem vnějšího tlaku. Tento tlak musí být tím větší, čím užší póry mají být zaplněny.

Princip měření rtuťovým porozimetrem spočívá ve sledování závislosti vloženého tlaku na úbytku rtuti v nádobce, z níž je rtuť vytlačována do pórů měřeného materiálu. Vysokých tlaků (200 MPa nebo 400 MPa) je dosaženo pomocí tlakových násobičů (multiplikátorů) [14].

Kapalinová porozimetrie – je založena na stejném principu jako rtuťová porozimetrie, liší se opačným znaménkem, protože kapalina (např. ethanol) je na rozdíl od rtuti z pórů vytlačována.

c. Proudění tekutiny – Carmanova-Koženého rovnice (viz. kap. 6.2.1.)

d. Filtrace aerosolu pevných částic (viz. Kapitola 7.2)

e. Prosévání definovaných částic – tato metoda spočívá v prosévání částic o určité velikosti sítí, jejichž otvory jsou menších rozměrů než je velikost částic. Je definována průměrná velikost částic, proto určitá část částic menších rozměrů než je průměrná velikost projde skrze síto. Tato část může být stejným způsobem opakovaně prosévána.

Ekvivalentem pro měření velikosti pórů může být jeho výpočet. Pro tento účel je nutné znát některé další parametry nanovláknenné vrstvy, jako je zaplnění, průměr a průřez nanovláken, tloušťka vrstvy, materiálové složení vláken a plošná hmotnost vrstvy. Způsob výpočtu velikosti pórů našich nanovláknenných vrstev je popsán v Kap.9.

4.1 Výpočet celkového objemu pórů:

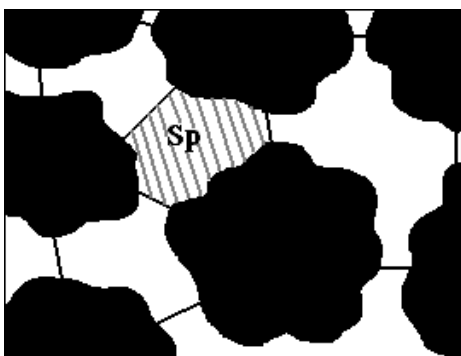
$$V_p = V_c - V \quad (4.1.2)$$

$$\psi = \frac{V_p}{V_c} = \frac{V_c - V}{V_c} = 1 - \mu, \quad (4.1.3)$$

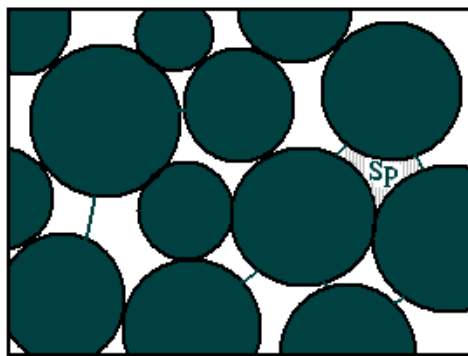
kde V_p je objem pórů vyskytujících se ve vláknenné vrstvě a ψ je poróznost.

4.2 Výpočet velikosti jednotlivých pórů

Póry se částí svého obvodu stýkají s vlákny, kde vznikají reálné hranice póru, těmi je určen obvod průřezu póru p_p , částí se stýkají s jinými póry, kde je nutné určit tzv. fiktivní hranice obvodu póru, aby bylo možné stanovit přibližnou hodnotu plochy průřezu póru s_p a ekvivalentní průměr póru d_p (Obr.4.2).



Obr.4.2: Průřez pórem mezi vlákny různých tvarů



Obr.4.3: Průřez pórem mezi kruhovými vlákny

Pro představu o průřezích pórů v nanovláknenných vrstvách vyrobených v našem experimentu budeme vycházet z kruhového průřezu vláken viz.Obr.4.3. Pak můžeme plochu průřezu póru a jeho ekvivalentní průměr definovat jako [11]:

$$s_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (4.1.4)$$

$$d_p = \sqrt{\frac{4s_p}{\pi}} \quad (4.1.5)$$

Důležitý je i tzv. tvarový faktor póru q_p , který je definován jako:

$$q_p = \frac{p_p}{\pi d_p} - 1 \quad (4.1.6)$$

$$q_p > -1 \quad (4.1.7)$$

Pro vlákna kruhového průřezu je $q_p = 0$.

Předpokladem je, že vlákenný útvar má všechny póry stejné a platí pro ně předchozí veličiny a vztahy, jsou to tzv. střední charakteristiky pórů. Další charakteristikou je souhrnná délka pórů L_p , pomocí níž lze vypočítat teoretický objem pórů V_p , povrch pórů A_p a objemový povrch pórů γ_p [11]:

$$V_p = s_p L_p = \frac{\pi d_p^2}{4} L_p \quad (4.1.8)$$

$$\gamma_p = \frac{A_p}{V_p} = \frac{4(1+q_p)}{d_p} \quad (4.1.9)$$

$$A_p = p_p L_p = \pi d_p (1+q_p) L_p \quad (4.2.0)$$

4.2.1 Konvenční póry

Geometrická představa o konvenčních pórech je taková, že tyto póry jsou vzduchové válce, jejichž objem i povrch jsou shodné s objemem a povrchem mezer mezi vlákny. Tvarový faktor konvenčních pórů $q_p^* = 0$. Je dána konvence: Velikost póru je charakterizována čtyřnásobkem veličiny $1/\gamma_p$, která vyjadřuje převrácenou hodnotu objemového povrchu a má rozměr délky. Pak průměr konvenčního póru bude definován rovnicí:

$$d_p^* = \frac{4}{\gamma_p} = \frac{d_p}{(1 + q_p)} \quad (4.2.1)$$

$$d_p^* (1 + q_p) = d_p \quad (4.2.2)$$

Plocha průřezu konvenčního póru:
$$s_p^* = \frac{\pi d_p^{*2}}{4} \quad (4.2.3)$$

Obvod průřezu konvenčního póru:
$$p_p^* = \pi d_p^* \quad (4.2.4)$$

Dosazením d_p^* do výrazu pro povrch pórů dostaneme rovnici:

$$A_p = \pi [d_p^* (1 + q_p)] (1 + q_p) L_p = \pi d_p^{*2} (1 + q_p)^2 L_p \quad (4.2.5)$$

$$(1 + q_p)^2 L_p = L_p^* \quad (4.2.6)$$

$$A_p = \pi d_p^{*2} L_p^* , \quad (4.2.7)$$

kde veličinou L_p^* je charakterizována délka konvenčních pórů. Veličiny q_p a L_p závisí na volbě fiktivních hranic, veličina L_p^* nikoliv.

Dosazením těchto parametrů do výrazu pro výpočet objemu pórů získáme vztah[11]:

$$V_p = \frac{\pi [d_p^* (1 + q_p)]^2}{4} \cdot \frac{L_p^*}{(1 + q_p)^2} = \frac{\pi (d_p^*)^2}{4} L_p^* \quad (4.2.8)$$

4.2.2 Vztah vláken a pórů

Je zde předpoklad, že povrch pórů je povrchem vláken, což lze zapsat jako:

$$A_p = A \quad (4.2.9)$$

$$\gamma_p V_p = \gamma V \quad (4.3.0)$$

$$\frac{4}{\gamma_p} = \frac{V_p}{V} \cdot \frac{4}{\gamma} \quad (4.3.1)$$

Platí:
$$\frac{V_p}{V} = \frac{V_p}{V_c} \cdot \frac{V_v}{V} = \frac{1-\mu}{\mu} \quad (4.3.2)$$

Ekvivalentní průměr póru:

$$d_p = \frac{4(1+q_p)}{\gamma_p} = \frac{V_p}{V} \cdot \frac{4}{\gamma} (1+q_p) = \frac{1-\mu}{\mu} \cdot \frac{4}{\gamma} (1+q_p) \quad (4.3.3)$$

$$d_p = \frac{1+q_p}{1+q} \cdot \frac{1-\mu}{\mu} d \quad (4.3.4)$$

Výpočet délky pórů:

$$\frac{V_p}{V} = \frac{(\pi d_p^2 / 4) L_p}{(\pi d^2 / 4) L} = \frac{d_p^2 L_p}{d^2 L} = \frac{1-\mu}{\mu} \quad (4.3.5)$$

$$L_p = \frac{d^2}{d_p^2} \cdot \frac{1-\mu}{\mu} L = \left(\frac{1+q}{1+q_p} \cdot \frac{\mu}{1-\mu} \right)^2 \frac{1-\mu}{\mu} L \quad (4.3.6)$$

$$L_p = \left(\frac{1+q}{1+q_p} \right)^2 \frac{\mu}{1-\mu} L \quad (4.3.7)$$

Objemový povrch pórů[11]:

$$\gamma_p = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \frac{4(1+q)}{d} \quad (4.3.8)$$

4.2.3 Zobecněné póry

Postupným odvozováním z předchozích vztahů lze dospět k definici ekvivalentního průměru póru (podle prof. Neckáře), kterou budeme následně používat pro teoretický výpočet velikosti jednotlivých pórů v nanovláknenných vrstvách vyrobených v našem experimentu. Výpočet použijeme pro srovnání s hodnotami získanými měřeními. Platí zde empirický předpoklad, že vztah pro ekvivalentní průměr póru lze zapsat jako:

$$d_p = \frac{k}{1+q} \left(\frac{1-\mu}{\mu} \right)^a d = \frac{1+q_p}{1+q} \cdot \frac{1-\mu}{\mu} d, \quad (4.3.9)$$

kde k je konstanta (pro póry s konstantní délkou se $k=1$), d je průměr vlákna, q je tvarový faktor vlákna a a je konstanta zvolená podle výsledků experimentálních měření. Pro póry s konstantním tvarovým faktorem je $a=1$, pro póry s konstantní délkou je $a=0,5$.

Tvarový faktor:

$$q_p = k \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)^{1-a} - 1 \quad (4.4.0)$$

Souhrnná délka pórů[11]:

$$L_p = \frac{(1+q)^2}{(1+q_p)^2} \cdot \frac{\mu}{1-\mu} L = \frac{(1+q)^2}{\left[k \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)^{1-a} \right]^2} \cdot \frac{\mu}{1-\mu} L \quad (4.4.1)$$

$$L_p = \frac{(1+q)^2}{k^2} \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)^{2a-1} L \quad (4.4.2)$$

Kapitoly 4.1 a 4.2 byly převzaty ze zdroje č. [11]

5 Popis procesu filtrace

Pro kompletní popis systému pevná látka/kapalina můžeme určit tři parametry. Jsou jimi **základní parametry**, stav systému neboli **proměnné parametry a výsledné vlastnosti**.

Základní parametry jsou ty, které lze měřit nezávisle na ostatních částech systému. Jsou jimi fyzikální parametry pevných částic a kapalin jako **velikost** (velikost rozložení a tvar částic) a **povrchové vlastnosti částic** v prostředí roztoku. Cesta interakce částice s okolní tekutinou nabývá důležitosti pro malé částice (částice o velikosti menší než 20 μm), potom se čistě přitažlivé nebo odpudivé síly mezi částicemi stanou významnými jako gravitační nebo hydrodynamické indukční síly. Tyto faktory například rozhodnou, zda-li se částice budou usazovat rychleji nebo pomaleji, jestli budou zadrženy na nějakém druhu filtru nebo jestli výsledný koláč bude mít suchou či mokrou strukturu.

Popis stavu systému (jímž jsou proměnné parametry jako porózita nebo koncentrace, homogenita a míra rozptýlení částic) v kombinaci se základními parametry kontroluje výsledné vlastnosti, jako např. propustnost, specifický odpor filtru nebo filtračního koláče, konečná rychlost usazování částic či množství usazovaných částic v poměru ke kapalině. Tyto vlastnosti jsou měřeny pro zkoumání aplikací jednotlivých separačních metod.

5.1 Tvar částic

Kapky se často přibližují tvaru koule, což vede k rozložení povrchových sil dokola částice. Naopak pevné částice jsou zřídka tvaru koule či jednotných tvarů. Určité třídy materiálů jsou v podstatě krystalické a mohou být vyrobeny ze zcela jednotných částic, kde každá z částic je např. krychlového či klencového tvaru. Ale krystalické materiály mohou být dokonce i mixem tvarů, především se tak děje při průmyslové výrobě, lom krystalu nastane v důsledku způsobu, jakým je s ním zacházeno. Ve skutečnosti může být lom způsoben samotným odstředěním a to je běžný problém např. posuvných odstředivek. Podstatná většina částic má nepravidelný tvar. Běžné jsou vláknité částice, ale mohou zaujímat velký rozsah délek a průměrů, mohou mít hladký či profilovaný povrch atd. [16].

5.2 Velikost částic

Částice se mohou lišit ve velikostech od velmi jemných (koloidních) látek či molekulárních shluků po hrubé pevné látky. V některých případech mohou být všechny pevné látky stejného materiálu, tzv. homogenní struktury. Častějším případem je vytékající suspenze, ve které každá částice může mít zcela odlišnou strukturu. Obecně má velikost částic významný vliv na chování usazeniny během procesu separace pevných částic z kapaliny. Znalosti technologie pro měření velikosti částic jsou proto důležité pro technologický proces. Byly stanoveny čtyři důvody pro měření velikosti částic v procesu filtrace:

1. Měření a určení kvality kapaliny, která je cenný produkt filtračního procesu. V případě, že zbylé částice v suspenzi jsou zředěné, jsou těžko filtrovatelné. Často je požadovaná pouze úplná koncentrace částic, jako např. v procesech čištění vody. Nicméně v operacích, které jsou podobné jako kapalinová filtrace, je velikost (a příležitostně tvar) zbylých částic rozhodující.
2. Rozsahem těchto požadavků je určit výkonnost filtru v podmínkách jeho schopnosti zadržet částice různých velikostí. Tento typ hodnocení je obvykle přiřazený k leštícím operacím a upřesnění základní velikosti pórů pro leštící prostředek nebo k určení provedení filtračního zařízení, jako je sedimentační odstředivka.
3. V mnoha operacích jsou cenným produktem pevné částice. Ty se zřídka dají obnovit do původního zcela suchého stavu a jsou často dále zpracovávány. Hodnocení produktu je závislé na kvalitě kontroly a nesouvisí jen s procesem separace. Metoda hodnocení je často určena zákazníkem nebo normami akceptovanými příslušným průmyslovým odvětvím.
4. Případným požadavkem je hodnotit pevné částice v pořadí předem určeném jejich pravděpodobným chováním v separačním procesu. To lze umožnit počátečním rozhodnutím mezi různými separačními metodami, výběrem a testováním příslušné předběžné úpravy procesu či filtru, zvýšením účinnosti existujícího zařízení, nebo odhadem rozsahu nové. V některých těchto příkladech lze předvídat výsledek a měřicí technika musí být vybrána mnohem pečlivěji než pro aplikace kontroly kvality (převzato ze zdroje č.[16]).

Existuje velké množství alternativních metod pro určení rozložení částic v suspenzi. Získané výsledky jsou závislé na použité metodě měření a často na schopnostech laboranta.

Znalost velikosti částic je běžně nutná při utváření filtračního koláče, s ním související úvahy o praní počítají s povrchovým obsahem o středním průměru x_{sv} . Jestliže byl kapalinový permeametr použit k měření průměrných velikostí částic, pak mohou být výsledky analyzovány užitím Koženého a Carmanovy rovnice, podle níž lze vypočítat specifický obsah povrchu (S_0). Obsah povrchu středního průměru souvisí se specifickým obsahem povrchu podle:

$$S_0 = \frac{6}{x_{sv}}, \quad (5.1)$$

kde S_0 je specifický obsah povrchu a x_{sv} střední průměr částic.

Při zjišťování velikosti jsou často praktické potíže, jako je dostupnost správně vybavené laboratoře pro odhad velikosti částic a tak měřené velikosti jsou blízké střednímu průměru x_{sv} . V dnešní době je běžné používat laserových přístrojů pro měření rozložení velikostí částic. Ve výpočtech o usazování či zahušťování částic, kde je třeba znát jejich velikost, je jedním z nejvhodnějších pro aplikaci tzv. Stokesův zákon. Ten navrhuje užití sedimentační měřicí techniky.

Další metody jako Andreasova pipeta a “fotosedimentometr“(zařízení měřící usazování částic v kapalině) spadají do této kategorie, stejně jako kumulativní metody, jako je sedimentační rovnováha. Rozsah velikosti částic při gravitačních sedimentačních technikách (od 1 do 60 μm) může být rozšířen i o malé částice (od 0,05 do 5 μm) při použití odstředivých zařízení [16].

5.3 Prostředí filtrovaného média

Reakce mezi částicemi a kapalinou mají větší vliv pokud jsou částice malých rozměrů, přesněji jsou-li částice menší než několik mikronů. Počátky interakčních odpudivých sil spočívají v rozdělení iontů roztoku kolem nabitého povrchu částic, výsledný elektrický náboj je závislý na chemických látkách přítomných na povrchu. Potenciální energie odporu může značně růst s odstupem od povrchu částice, ale jejich rozsah může být redukován vzrůstem obsahu elektrolytu v roztoku. Pro praktické účely je velikost čistě odpudivých sil mezi částicemi reprezentována zeta (ζ -) potenciálem a následné příkazy mohou být vytvořené vlivem ζ -potenciálu v procesu separace pevná látka / kapalina:

- a) Čistě odpudivé síly mezi částicemi rostou s obsahem podílu pevných látek ve směsi pevná látka / kapalina.
- b) Čistě odpudivé síly rostou se vzrůstem ζ -potenciálu.
- c) Snižování velikosti odpudivých sil vede k nestabilitě disperze (tvoří se shluky částic) a zpravidla ke snadnější separaci částic.
- d) Odpudivé síly mohou být snižovány přidáním neabsorpčního elektrolytu do kapaliny pro změnu rozptýlení iontů roztoku kolem částic nebo změnou elektrického náboje na povrchu částic použitím specifické adsorpcí jistých iontů nebo nabitých polymerů[16].

6 Průchod kapaliny porézním prostředím – D'Arcyho zákon

Tato kapitola se týká toku skrz filtrační média a filtračního koláče. Filtrační koláče se řadí mezi porézní prostředky. Jsou to shluky částic, které mohou být zobrazeny jako pevná kostra, skrz kterou může pronikat tekutina. Podobnosti mezi tokem kapaliny skrze kapiláry nebo pravidelným průřezem a póry v porézním prostředí jsou běžně akceptovány. Ve skutečnosti jsou takto nazývané póry prázdné a nemají skutečný průřez, ani nejsou pravidelně rozloženy v objemu filtru. Nicméně některé analogie a modely zvětšují míru našeho porozumění filtrační problematice.

6.1 D'Arcyho zákon

Modely koláčové filtrace jsou založeny na D'Arcyho zákonu, který byl vyvinutý původně pro popis toku vody skrz póry pískového dna. Přestože částice písku byly mnohem větší a pravidelnějších tvarů ve srovnání s mnoha částicemi separovanými při filtraci, základy toku skrz částice pískového dna stanovené D'Arcym poskytly platnou formulaci pro popis toku skrz filtrační koláč.

V roce 1855 D'Arcy uskutečnil řadu experimentů zahrnujících tok vody skrz pískovou vrstvu umístěnou ve svislé železné trubici. Během testů, kdy použil dva různé druhy písků, D'Arcy objevil, že rychlost toku je úměrná spádu, což značilo, že režim toku je laminární (vláknitý).

Přestože D'Arcy nezahrnul do své původní rovnice viskozitu, jeho vzorec popisující tento pozorovaný vztah je obvykle psán takto:

$$u = \frac{-k}{\mu} \frac{dp}{dz}, \quad (6.1)$$

kde dp je dynamický (hydraulický) rozdíl tlaku na tloušťku dz porézního prostředí o permeabilitě k , a u je rychlost (objem průtokové rychlosti na jednotku průřezu plochy dna, $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) kapaliny o viskozitě μ protékající skrz dno. V zahuštěném dnu lze obvykle předpokládat, že pevné částice budou statické a u bude konstantní[16].

Důležitým předpokladem D'Arcyho zákona je malé Reynoldsovo číslo a tím i malé vlivy setrvačnosti na tok. Běžně mylnou představou o porézních prostředcích je, že při nárůstu rychlosti toku je D'Arcyho zákon porušován vlivem turbulence v pórech. Ve skutečnosti Reynoldsovo číslo zřídka nabývá většího rozsahu a turbulence můžeme zanedbat.

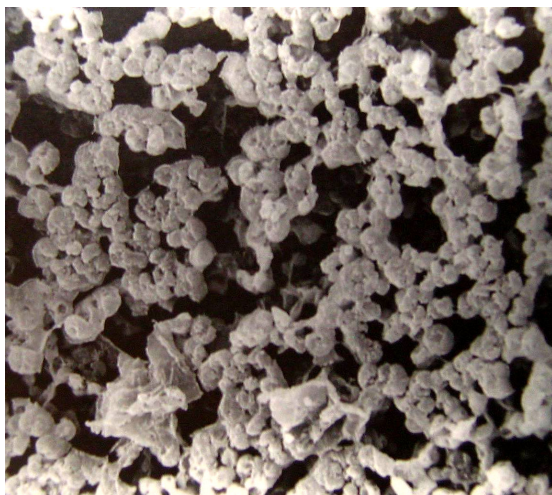
V praxi je D'Arcyho zákon platný pro velký rozsah toků, ale selhává při Reynoldsově čísle v pořadí od 1 do 10 z důvodu růstu setrvačných sil v laminárním toku. Reynoldsovo číslo (Re) je založené na velikosti obtékaných částic (x) je definováno jako:

$$Re = \frac{\rho_k u x}{\mu}, \quad (6.2)$$

kde Re je Reynoldsovo číslo, ρ_k je hustota kapaliny, u je rychlost kapaliny, μ je viskozita kapaliny a x je velikost obtékaných částic.

6.2 Permeabilita a specifický odpor

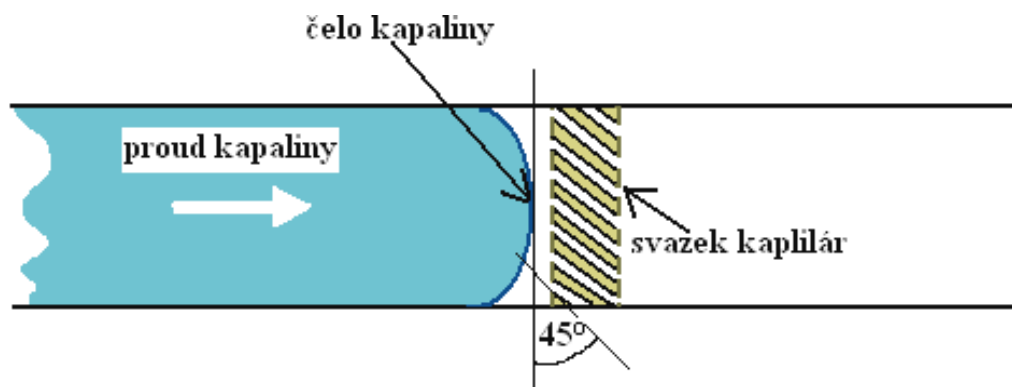
Permeabilita porézního prostředí může být považována za míru snadnosti s jakou bude kapalina protékat skrz. Velikost permeability je určena množstvím vzduchu ve filtru, který může být formálně lépe formulován jako poróznost prostředí a velikosti pórů přítomné v jeho vnitřní struktuře. Komplexnost vnitřní struktury pórů je ukázána na Obr.6.1, tuto komplexní geometrii je v současnosti nemožné matematicky popsat. Z toho vyplývá nutnost vyvinout modely popisující vlastnosti porézních prostředí. Nejjednodušší a pravděpodobně nejvíce užívaný model pro popis souvislosti permeability a poróznosti filtračního koláče a pro určení průměrné velikosti částic utvářejících filtrační koláč je model vyvinutý kombinací konceptů Koženého (1927) a Carmana (1938) o porézních prostředích.



Obr.6.1: Mikrosnímek filtračního koláče, utvořeného z čajových částic usazených na polymerní membráně, ukazuje komplexní geometrii pórů a permeabilní strukturu v koláči (poměr: 1000:1)[16].

6.2.1 Koženého a Carmanova rovnice

Model Koženého a Carmana je založen na porézním prostředí, které reprezentuje svazek kapilárních trubiček, jejichž orientace je 45° k přítoku kapaliny čelně k filtru. V tomto případě je energie ztracena z tekoucí kapaliny, kde se dostává do kontaktu s povrchy kapilár (Obr.6.2).



Obr.6.2: Filtr v podobě svazku kapilár

Zjednodušeně, když kapalina teče skrze porézní těleso, ztrácí svoji energii kontaktem s vnitřním povrchem tělesa. Vnitřní povrchy mají velmi komplexní geometrii, která nemůže být jednoduše matematicky popsána, ale pro praktické účely ji lze jednoduše interpretovat skrze poróznost a specifický povrch porézního prostředí. Koláčová filtrace zahrnuje laminární tečení kapaliny a Reynoldsovo číslo je založeno na velikosti částic.

Koženého – Carmanova rovnice:

$$u = \frac{\varepsilon^3}{5\mu \cdot S_0^2(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{\Delta p}{L}, \quad (6.3)$$

kde u je rychlost proudění filtrované kapaliny, ε je poróznost filtru, μ je viskozita filtru, S_0 je měrný povrch částic, Δp je rozdíl tlaku před filtrem a po průchodu filtrem a L je tloušťka filtračního koláče [m^2/m^3]. (Kap.6 byla převzata ze zdroje č.[16].)

7 Experiment

7.1 Úvod

První částí experimentu bylo zkoumání vlivu počtu vrstev nanovláken na filtrační vlastnosti (při konstantní plošné hmotnosti). Vycházeli jsme z myšlenky, že, vyrobíme-li nanovláknennou vrstvu o dané plošné hmotnosti postupným nanášením několika nánosů na sebe, dojde ke vzájemnému překrytí nánosů, a taková vrstva bude mít lepší filtrační vlastnosti než vrstva vyrobená pouze jedním nánosem o přibližně stejné plošné hmotnosti. Každý samotný nános má nepravidelnou porézní strukturu a je zde předpoklad, že v místech větších pórů dojde dalším nánosem k jejich částečnému překrytí vlákny a tím k větší stabilitě velikosti průřezů jednotlivých pórů. Problémem filtrace je fakt, že tekutina i s filtrovanými částicemi proudí cestou nejmenšího odporu, tedy především těmi největšími póry. Čím menší bude rozptyl mezi velikostí pórů v textilií, tím menší částice budou zachytávat a zvýší se tak účinnost filtru.

V druhé části experimentu byl sledován vztah mezi hodnotami velikosti pórů naměřenými kapalinovou metodou, hodnotami velikosti pórů vypočítanými teoreticky a filtrace definovaných částic.

Třetí část experimentu byla zaměřena na možnost přípravy polyuretanové nanovláknenné vrstvy s obsahem biologicky aktivních látek. Cílem je možnost přípravy filtru, který je vhodný pro ničení bakterií ve vodě.

7.2 Experiment, část 1: vliv počtu vrstev na filtrační vlastnosti

Cílem experimentu bylo vyrobit nanovláknennou vrstvu (vzorek 1N) jedním nánosem o dané plošné hmotnosti a při určité rychlosti odtahu podkladové textilie (podkladová textilie je v tomto případě nezbytná, nanovláknenné vrstvy samotné by nebylo možno navíjet ani odtahovat, došlo by k jejich porušení). A vyrobit takovou vrstvu (vzorek 4N) postupným nanášením 4 nánosů na sebe při rychlosti čtyřnásobně vyšší než u vzorku 1N, která by se svou plošnou hmotností blížila plošné hmotnosti vzorku 1N, v ideálním případě by byly hodnoty shodné. Následně byly měřeny a porovnávány hodnoty plošných hmotností jednotlivých vzorků, jejich filtrační vlastnosti pro suchou filtrace a velikosti pórů. Testování efektivity filtrace vzduchu byla použita z důvodu nemožnosti testování efektivity filtrace vody.

Stejným způsobem byl vyroben a testován filtr tvořený šesti nánosy 6N' a jedním nánosem 1N' s konstantní plošnou hmotností.

7.2.1 Popis experimentu

Metodou elektrostatického zvlákňování z volného povrchu válečku (nanospider, viz. Obr.7.1 a Obr.7.2) jsme nanесли vrstvu nanovláken z roztoku polyuretanu na podkladovou textili. Tímto způsobem jsme vyrobili vzorky 1N, 4N, 1N', 6N' a pomocné vzorky 4Na, b, c, které byly vyrobeny pro případ, kdy by plošná hmotnost vzorků 1N a 4N nebyla podobná. Všechny vzorky se navzájem liší pouze odtahovou rychlostí podkladové textilie a počtem nánosů. Podmínky zvlákňování včetně parametrů jednotlivých vzorků jsou uvedeny v Kap.7.2.2, v Tab.1 a 2.

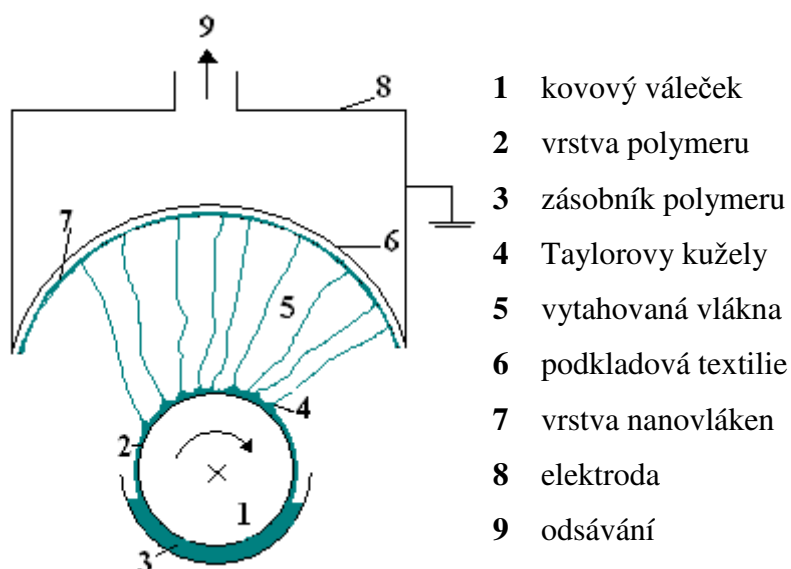
Následovalo měření plošných hmotností a filtračních vlastností jednotlivých vzorků (výsledky měření jsou uvedeny v Kap.7.2.3, v Tab. 4 a 5). Filtrační vlastnosti byly měřeny testováním efektivity filtrace vzduchu na přístroji Bench Mounting Rig type 1100 P pomocí testu filtrace aerosolem NaCl (Obr.7.3). Popis principu testu je uveden v Kap. 7.2.2 Parametry experimentu.

Dále jsme se zabývali zjišťováním velikosti největšího póru jednotlivých vzorků nanovrstev vyrobených v předchozích částech experimentu. Z praktického hlediska je nejjednodušší zjistit velikost největšího póru v textili, neboť to je místo, kde při postupném zvyšování tlaku dojde nejdříve k vytlačení kapaliny z póru – objeví se první bublinka vzduchu. Porozita, neboli velikost pórů v textili je důležitá charakteristika transportních vlastností textilních materiálů. Má úzký vztah zejména k prodyšnosti a filtračním vlastnostem. Součástí experimentu bylo také měření hodnoty průměrné velikosti pórů vzorků.

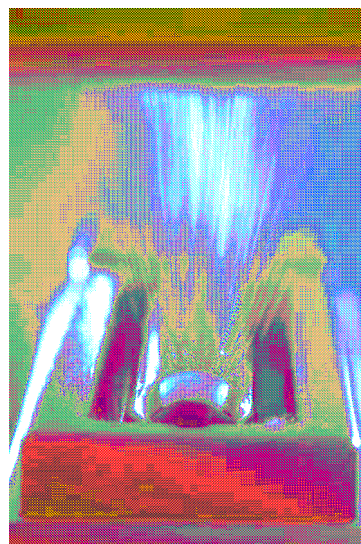
7.2.2 Parametry

A. Parametry procesu elektrostatického zvlákňování nanovláken

Schéma zvlákňovacího zařízení Nanospider, na kterém byly vyrobeny jednotlivé vzorky nanovláknenných vrstev je na obr.7.1. Na Obr.7.2 je znázorněn detail kovového válečku ponořeného v roztoku polymeru, ze kterého jsou vytahována nanovlákná.



Obr.7.1: Schéma zvlákňovacího zařízení



Obr.7.2: Váleček v roztoku polymeru[5]

Parametry a značení jednotlivých vzorků ukazuje tab. 1:

vzorek	počet nánosů	odtahová rychlost
1N	1	0,08
4N	4	0,32
4Na	4	0,08
4Nb	4	0,06
4Nc	4	0,1
1N'	1	0,1
6N'	6	0,6
1NJ	1 *	0,1
1NH	1 **	0,1

Tab.1: Parametry jednotlivých vzorků

* vzorek s obsahem jódu

** vzorek s obsahem HI-6

Parametry zvlákňovacího procesu jsou v tab.2.

Vzorek	Teplota [°C]	Vlhkost [%]	Napětí [kV]	Vzdálenost elektrod [mm]	Podkladová textilie	Roztok polymeru
1N 4N 4Na 4Nb 4Nc	20,4	18,2	80	175	Materiál polypropylen Technologie SPUN- BOND pojený rastrováním kalandrem Plošná hmotnost 18g/m ² Antistatická úprava	Složení: ▪ 115g 30% roztoku polyuretanu v dimethylformamidu (DMFA) ▪ 50g dimethylformamidu ▪ 55g tetraethylenamonium- bromidu rozpuštěného v DMFA ▪ 5g vody
1N'	19.7	18.7	80	175		
6N'						

Tab.2: Parametry zvlákňovacího procesu

B. Parametry procesu testování efektivity filtrace vzduchu

Pro testování efektivity filtrace nebylo použito zařízení pro testování efektivity filtrace kapalin z důvodu probíhajícího vývoje tohoto zařízení. Testovali jsme tedy efektivitu filtrace vzduchu na zařízení Bench Mounting Rig type 1100, které měří odlučivost částic menších 2μm, tlakový spád a průtok vzduchu pronikajícího testovaným filtrem. Test je prováděn podle normy BS 4400, to je Britská norma: 'Method for Sodium Chloride Particulate Test for Respirator Filters'. Zařízení je určeno zejména pro vysoce účinné filtry, například HEPA filtry, filtry třídy F a jiné[3].

Parametry testu efektivity filtrace vzduchu na zařízení Bench Mounting Rig.	
Průtok [l/min]	50
Náletová rychlost částic [m/min]	5
Velikost částic [μm]	0,02 – 2
Střední velikost částic [μm]	0,6
Koncentrace částic [mg/m ³]	13
Filtrační plocha [m ²]	0.01

Tab.3: Parametry testu efektivity filtrace vzduchu



Obr.7.3: Zařízení Bench Mounting Rig type 1100

Princip testu filtračních vlastností aerosolem NaCl podle normy BS 4400:

Roztok chloridu sodného (10% NaCl) je rozprašen a zbaven vody ve vypařovací trubici. Výsledkem jsou částice soli definované velikosti, které nalétávají definovanou rychlostí 5m/min na testovaný vzorek (zároveň je snímán tlakový spád vzorku).

V hořáku 9 hoří modrý plamen směsi vodíku a vzduchu. Projdou – li testovaným filtrem částice NaCl, obarví plamen dožluta. Čím více částic projde, tím je větší intenzita žluté barvy plamene. Intenzitu žluté barvy plamene snímá spektrofotometr. Výstupem je hodnota napětí v mV, hodnota průniku částic testovaným vzorkem je určena vzorcem: $P = U_1/U_2 [\%]$, kde U_1 je napětí naměřené na testovaném vzorku a U_2 je maximální napětí naměřené na tzv. 100% vzorku, tedy za situace, kdy v měřicí cele není upnut žádný vzorek. Pro přesné měření je nutné určit nulový stav přístroje, kdy v hořáku hoří vodík a vzduch přicházející cestou I.

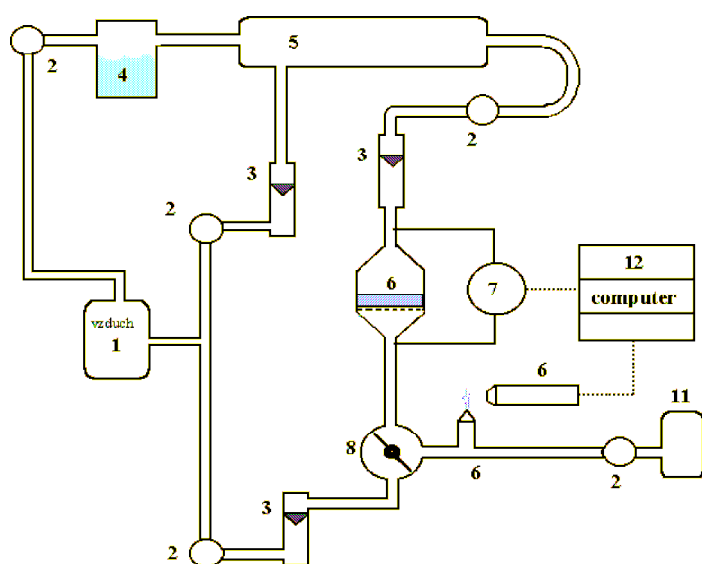
Vzduch může v přístroji procházet v zásadě 3 cestami:

I. cesta je pro určení nulového stavu přístroje a pro výměnu testovaného filtru – vzduch neprochází filtrem.

II. cesta je pro určení tlakového spádu filtru a vyčištění přístroje – vzduch prochází filtrem, ale neobsahuje částice soli.

III. cesta pro měření průniku částic filtrem.

Schéma testu filtračních vlastností aerosolem NaCl podle normy BS 4400:

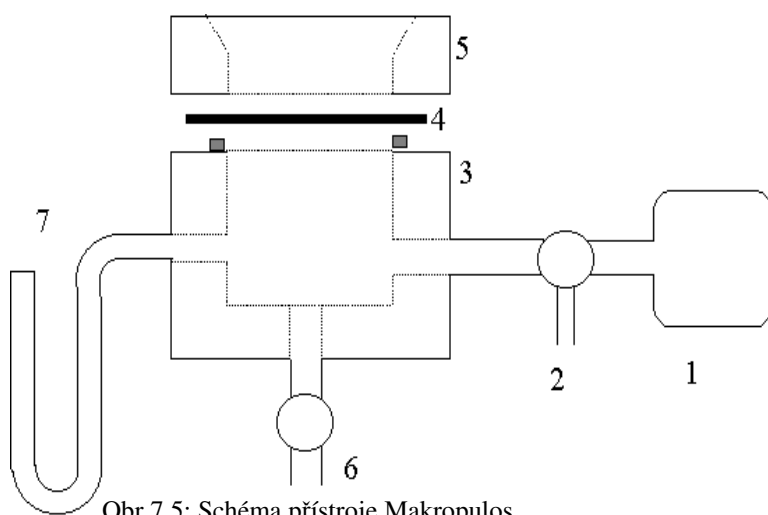


Obr.7.4: Schéma zařízení Bench Mounting Rig type 1100

- 1 přívod stlačeného vzduchu
- 2 regulační ventil
- 3 průtokoměr
- 4 rozprašovač
- 5 vypařovací trubice
- 6 měřicí cela se vzorkem filtru
- 7 měření tlakového spádu
- 8 přepínací ventil
- 9 hořák
- 10 spektrofotometr snímající intenzitu žlutého světla
- 11 láhev se stlačeným vodíkem
- 12 počítač[3]

C. Parametry určování velikosti největších pórů

Velikost největšího póru jsme určovali pomocí bublinkové metody na měřícím přístroji Makropulos 5 (viz. Obr.7.5).

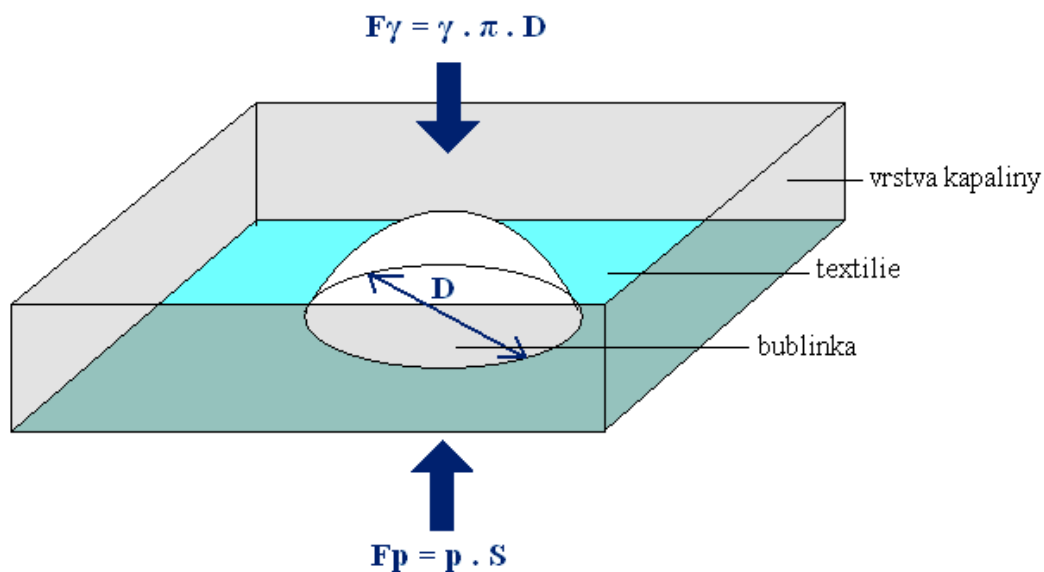


Obr.7.5: Schéma přístroje Makropulos

Popis schématu:

- 1 Vzduchovací motorek
- 2 Vzduchový ventilek
- 3 Testovací cela
- 4 Testovaný vzorek
- 5 Upínací hlavice
(do které se nalívá ethanol)
- 6 Vypouštěcí ventil [4]
- 7 Manometr

Bublinková metoda je jednou z nepřímých metod, s jejíž pomocí lze zjišťovat velikost největšího póru v textilií [4]. Měřená textilie se vloží na ústí testovací cely, upevní se upínací hlavicí, na povrch textilie se lije ethanol, dokud se nevytvoří rovná hladina. Postupně je vzduchem proudícím ze vzduchového motorku vyvíjen na textilií tlak, který zvyšujeme do té chvíle, než se na hladině objeví první bublinka vzduchu. V tuto chvíli odečteme příslušnou hodnotu tlaku, z něhož pomocí výpočtu (7.1) určíme velikost příslušného maximálního póru. Naměřené hodnoty jednotlivých vrstev jsou uvedeny v Tab.6. Základ podstaty této metody lze pozorovat na Obr.7.6.



Obr.7.6: Podstata bublinkové metody[4]

Z rovnováhy síly F_γ dané povrchovým napětím kapaliny působící po obvodu póru a síly F_p dané tlakem vytlačujícím kapalinu z póru lze vypočítat velikost průměru póru za předpokladu jejich kruhového průřezu (výsledky výpočtů jsou uvedeny v Tab.5),

Výpočet velikosti průměru maximálního póru:

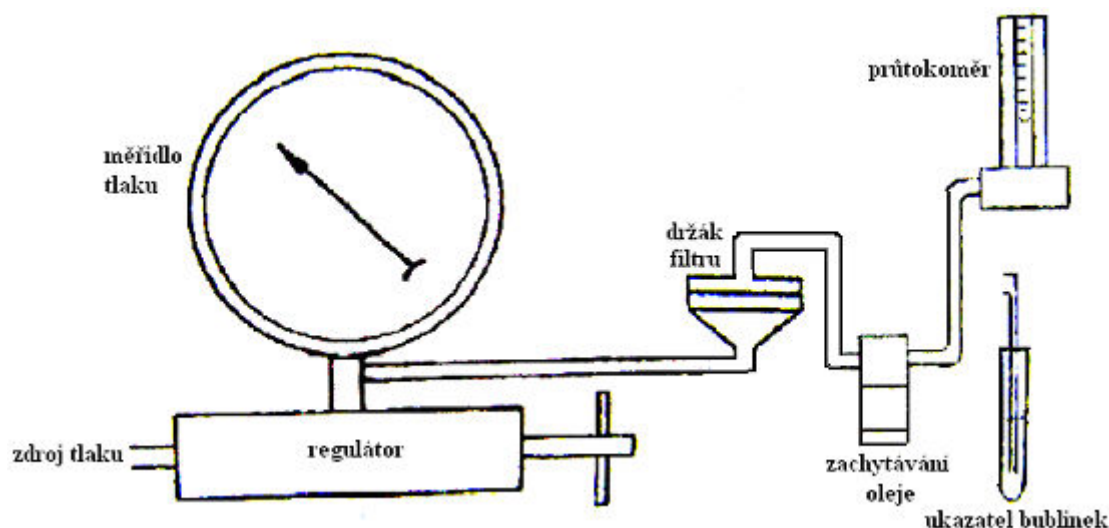
$$\begin{aligned}
 F_\gamma &= F_p \\
 \gamma \cdot \pi \cdot D &= p \cdot S \\
 \gamma \cdot \pi \cdot D &= p \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \Rightarrow D = \frac{4\gamma}{p}
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

kde γ je povrchové napětí kapaliny (γ ethanolu = 0,0228 N), D je průměr póru, π je Ludolfovo číslo, p je vnější tlak vytěsňující kapalinu z póru a působící na ploše póru S .

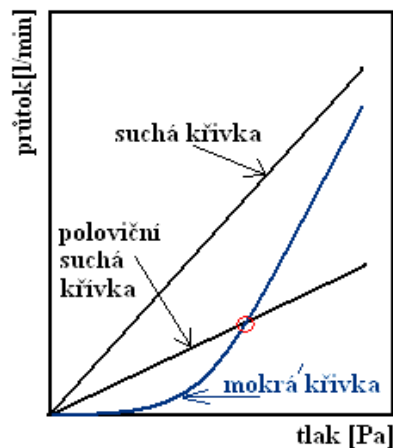
D. Popis metody určování velikosti průměrných pórů pomocí bublinkové metody

Podstata metody je stejná jako u měření největšího póru bublinkovou metodou. Protože měřená textilie samotná klade odpor vůči tlaku vzduchu, je nutné změřit hodnotu tlaku při průchodu vzduchu suchým filtrem a odečíst ji od hodnoty tlaku vzduchu procházejícím filtrem smočeným kapalinou. Mokrým filtrem prochází vzduch pod takovým tlakem, aby překročil kapilární přitažlivost kapaliny v pórech a vytlačil ji z pórů ven. Když se vytlačí 1. bublinka vzduchu skrze filtr (největším pórem), začne se měřit tlak. Nesledujeme měření pouhým okem, průtok vzduchu je zobrazen na průtokoměru. Menší póry ukáží podobné reakce při vyšším tlaku.

K určení průměrné velikosti pórů měřené vrstvy je hledán tlak toku vzduchu, při kterém je průtok smočeným filtrem roven jedné polovině průtoku suchým filtrem při určitém tlaku, tato situace je znázorněna v grafu 1 červeným kroužkem [20]. Velikosti průměrných pórů jsou pak vypočteny ze vztahu tlaku a velikosti – vztah (7.1).



Obr.7.7: Schéma zařízení pro měření průměrných velikostí pórů



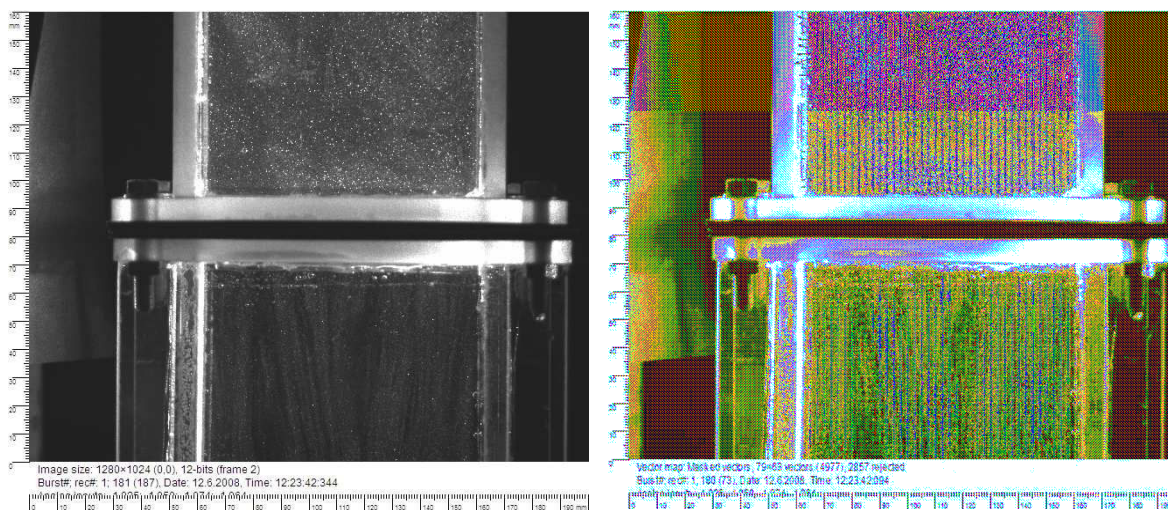
Graf 1: Zjištění velikosti průměrného póru [20]

E. Popis zařízení pro testování efektivity filtrace kapalin

Uvedené zařízení bohužel nebylo možné v našem případě použít, současné zařízení nedává plnohodnotné výsledky, není dostatečně dobře utěsněné. Nová verze zařízení na testování efektivity filtrace kapalin nebyla dosud dokončena. Je-li měřeným médiem kapalina (voda), je nutné dbát mnohem důsledněji na těsnost kanálu a kontrolovat provozní tlak. Systém je v tomto případě přetlakový, poháněný vodním čerpadlem AL-KO RAIN 2500 (maximální tlak 1.1 bar, maximální průtok 0.7l/sec), které je ponořené v nádrži. Čerpadlo nemá vlastní regulaci, a tak se průtok měřicí částí kanálu nastavuje pomocí dvou ventilů, které škrtí uzavřený okruh (z nádrže zpět) a otevřený okruh (z nádrže skrz měřicí kanál do odpadu).

Ukázka měření ve vodním kanálu na jiném vzorku:

Filtrem je papírový nosný materiál s nanovláknennou vrstvou, filtrované částice jsou z materiálu polyamid, velikosti 5 μm , rychlost proudění kapaliny je 6mm/s, tlak nad filtrem je 8-9 kPa (postupně roste se zacpáváním filtru). Měření m92, m93 a m94 následovala hned za sebou beze změny jakýchkoliv parametrů asi s 90s prodlevou na stažení dat. Na Obr. 12 je ukázáno pouze měření m92 pro představu, je patrné, že filtr s nanovláknennou vrstvou část částic zachytává a část propouští.



Obr.7.8: m92 – zachytávání částic na filtru, vypočítané vektorové pole

Vyhodnocování filtračních vlastností vrstev měřených ve vodním kanálu lze provést pomocí obrazové analýzy nebo počítáním částic prošlých filtrem ku celkovému počtu částic [15].

7.2.3 Výsledky

Výsledky měření plošných hmotností a filtračních vlastností (efektivita, tlakový spád) vzorků 1N, 4N, 4Na, 4Nb a 4Nc jsou uvedeny v tab. 4. Z každého vzorku byly měřeny tři části: **A** ze začátku, **B** uprostřed a **C** z konce každého vzorku (délka vzorku byla 0,5 – 1m).

				Průměrné hodnoty	Směrodatná odchylka
Vzorek	1N				
Část	A	B	C		
Plošná hmotnost [g/m²]	2,71	2,28	2,69	2,56	0,24
Efektivita [%]	98,19	97,76	94,38	96,78	2,1
Tlak [Pa]	435	370	351	385,33	44,1
Vzorek	4N				
Část	A	B	C		
Plošná hmotnost [g/m²]	2,41	2,2	2,05	2,22	0,18
Efektivita [%]	97,87	97,98	97,7	97,85	0,14
Tlak [Pa]	415	385	364	388	25,6
Vzorek	4Na				
Část	A	B	*	*	*
Plošná hmotnost [g/m²]	3,0	4,0			
Efektivita [%]	*	98,53			
Tlak [Pa]	*	520			
Vzorek	4Nb				
Část	A	B	C		
Plošná hmotnost [g/m²]	3,08	2,56	2,79	2,81	0,26
Efektivita [%]	97,73	99,92	99,39	99	1,14
Tlak [Pa]	641	1595	934	1056,67	488,67
Vzorek	4Nc				
Část	A	B	C		
Plošná hmotnost [g/m²]	2,35	1,44	3,12	2,3	0,84
Efektivita [%]	98,99	98,14	94,56	97,23	2,35
Tlak [Pa]	578	495	341	471,33	120,26

Tab.4: Výsledky opakovaného měření plošných hmotností a filtračních vlastností

* poznámka neměřeno z důvodu malého rozměru vzorku

Výsledky měření plošných hmotností a filtračních vlastností (efektivita, tlakový spád) vzorků 1N' a 6N' jsou uvedeny v tab.5. Z každého vzorku byly postupně měřeny čtyři části: **A, B, C, D** (délka vzorku byla 0,5 – 1m).

Vzorek	1N'				Průměrné hodnoty	Šměrodatná odchylka
Část	A	B	C	D		
Plošná hmotnost [g/m ²]	1,4	1,12	1,94	1,97	1,61	0,42
Efektivita [%]	96,67	89,4	95,77	97,22	94,77	3,6
tlak [Pa]	345	232	360	384	330	67,44
Vzorek	6N'					
Část	A	B	C	D		
plošná hmotnost [g/m ²]	0,88	1,32	2,08	2,0	1,57	0,57
Efektivita [%]	91,65	91,54	94,84	93,5	93,88	1,6
tlak [Pa]	230	259	292	319	275	38,76

Tab.5: Výsledky měření plošných hmotností a filtračních vlastností vzorku 1N' a 6N'

Výsledky měření velikosti největších pórů jsou uvedeny v tab. 6:

Vzorek	část	1N	4N
Velikost průměru D max.póru[μm]	A	38,81	39,65
	B	38	38
	C	91,2	53,65
Průměrné hodnoty velikosti pórů [μm]		56	43,77
Směrodatná odchylka velikosti pórů		30,5	8,59
Vzorek	část	1N'	6N'
Velikost průměru D max.póru[μm]	A	114	114
	B	48	60,8
	C	65	48
Průměrné hodnoty velikosti pórů[μm]		76.67	74.27
Směrodatná odchylka velikosti pórů		34,3	35

Tab.6: Výsledky měření velikosti největších pórů

Výsledky měření průměrných pórů vzorků 1N a 4N jsou uvedeny v tab. 7. Tyto výsledky slouží pro porovnání s vypočítanými hodnotami (kap.7.3.1). Nejsou zde uvedeny výsledky měření hodnot průměrných pórů vzorků 1N' a 6N', pro tyto vzorky nebylo možno provést výpočty velikosti průměrných pórů z důvodu nefunkčnosti elektronového mikroskopu a tudíž nebyly měřeny velikosti průměrných pórů..

	Vzorek 1N	Vzorek 4N
Tlak průměrného póru [Pa]	177500	123000
Velikost průměrného póru [μm]	0,653521	0,943089

Tab.7: Výsledky měření velikostí průměrných pórů vzorků 1N a 4N

7.2.4 Diskuze

V rámci prvního experimentu se nám podařilo vyrobit vzorky nanovlákných vrstev mající přibližně stejnou plošnou hmotnost a různé počty nánosů. V případě porovnávání vzorků 1N, 4N a pomocných vzorků dosahuje nejlepších podobností plošných hmotností vzorek 1N a 4N, k tomu také přispěly nízké hodnoty směrodatných odchylek. Předpokládali jsme, že vzorek 4N bude mít lepší filtrační vlastnosti. Průměrná hodnota efektivity vzorku 4N je o málo větší než průměrná hodnota 1N, ale dá se říct, že jsou si velmi podobné, takže se náš předpoklad jednoznačně nepotvrdil. Rozdíl průměrných hodnot efektivit nepřevyšuje rozdíl směrodatných odchylek (viz tab. 4).

V případě porovnávání vzorku 1N' a 6N' jsme chtěli zjistit, zda ovlivníme vlastnosti filtru zvýšením počtu nánosů ze čtyř na šest nánosů. Efektivita filtrace vzduchu se však ukázala lepší u vzorku 1N', což neodpovídá našim předpokladům.

7.3 Experiment, část 2, srovnání naměřených a vypočítaných hodnot velikostí pórů a filtrace

7.3.1 Výpočet velikosti pórů nanovrstev podle Neckáře

Předpokládáme, že průměry pórů v našich vzorcích mají kruhový tvar, tudíž tvarový faktor $q = 0$, další předpoklad je, že póry mají konstantní délku, proto $k = 1$ a $a = 0,5$. Průměry nanovláken jsme měřili na obrazové analýze Lucia, naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab.8.

vzorek	průměr vlákna[μm]	četnost
1N	0,2	2
	0,3	21
	0,4	32
	0,5	5
Průměrná hodnota d 0,37		
vzorek	průměr vlákna[μm]	četnost
4N	0,3	33
	0,4	21
	0,5	5
	0,6	1
Průměrná hodnota d 0,36		

Tab.8: Výsledky měření průměrů nanovláken vzorků 1N a 4N

Odvodíme vztah pro výpočet zaplnění pro naše vzorky vyrobené v předchozí části:

$$\mu = \frac{V_{Pu}}{V_C} = \frac{\frac{m}{\rho_{Pu}}}{\frac{m}{\rho}} = \frac{m}{\rho_{Pu} \cdot h} , \quad (7.2)$$

kde μ je zaplnění, V_{Pu} je objem polyuretanu, V_C je celkový objem vrstvy, m je průměrná plošná hmotnost vzorku (dosadíme z Tab. 4), ρ_{Pu} je hustota polyuretanu ($\rho_{Pu}=1200 \text{ kg/m}^3$), ρ je hustota vzorku a h je tloušťka vzorku. Budeme uvažovat, že tloušťka našich vzorků $h = 20\mu\text{m}$, je to hodnota stanovená staršími měřeními, vlastní hodnotu nebylo pro tuto práci možno získat z důvodu nefunkčního elektronového mikroskopu.

Hodnoty zaplnění μ pro jednotlivé vzorky:

1N: $\mu = 0,133$

4N: $\mu = 0,098$

1N': Hodnotu nebylo možno počítat z důvodu dlouhodobé nečinnosti elektronového mikroskopu.

6N': Hodnotu nebylo možno počítat z důvodu dlouhodobé nečinnosti elektronového mikroskopu.

Dosadíme-li všechny hodnoty do vzorce (4.3.9) pro výpočet velikosti pórů, dostaneme hodnoty velikostí průměrných pórů jednotlivých vzorků získané výpočtem:

1N: **$d_p = 0,95$**

4N: **$d_p = 1,09$**

1N': Hodnotu nebylo možno počítat z důvodu dlouhodobé nečinnosti elektronového mikroskopu.

6N': Hodnotu nebylo možno počítat z důvodu dlouhodobé nečinnosti elektronového mikroskopu.

7.3.2 Diskuze

Měřili jsme hodnoty maximálních pórů, ty se pohybovaly řádově v desítkách i stovkách mikrometrů, proto budeme pro srovnání uvažovat hodnoty průměrných pórů. Z tab.7 známe bublinkovou metodou naměřené hodnoty průměrných pórů:

1N: **$d_p' = 0,654$**

4N: **$d_p' = 0,943$**

1N': Hodnotu nebylo možno počítat z důvodu dlouhodobé nečinnosti elektronového mikroskopu.

6N': Hodnotu nebylo možno počítat z důvodu dlouhodobé nečinnosti elektronového mikroskopu.

Při srovnávání vypočítaných a naměřených hodnot průměrných velikostí pórů můžeme říci, že se významně neliší, a proto můžeme konstatovat, že teoretický výpočet velikosti pórů se zdá být relativně použitelný pro případnou náhradu měření velikosti pórů.

Porovnáváme-li vypočítané a naměřené hodnoty velikostí průměrných pórů s průměrnými hodnotami efektivity vzdušné filtrace (tab. 4), můžeme říci, že oba vzorky se vyznačují průměrnými póry menších rozměrů než je střední velikost zachytávaných částic při vzduchové filtraci, to je pro filtraci podstatné. Čím menší budou póry filtru, tím lepší bude jeho účinnost. Nicméně velikosti maximálních pórů převyšují hodnoty velikostí průměrných pórů, což stále ukazuje na značnou hmotovou nestejnouměrnost.

7.4 Experiment, Část 3, vrstvy s aktivními látkami

Další součástí experimentu zjistit, zda lze připravit nanovláknennou vrstvu s aktivními látkami. Naším cílem bylo zjistit, zda-li půjde dané vzorky s aktivními látkami zvláknovat a jak přidané látky ovlivní průběh a výsledek zvláknovacího procesu. Použité aktivní látky byly: jód a HI-6 mesylate (složení vzorku utajeno), do zvláknovaného roztoku za účelem zlepšení filtračních vlastností. Vytvořili jsme nanovláknenné vrstvy 1NJ a 1NH jedním nánosem při rychlosti 0,1 m/min, u kterých lze předpokládat, že díky aktivním látkám budou mít antiseptický účinek.

Složení vzorků s aktivními látkami:

Vzorek 1NJ: roztok PU + roztok jódu v ethanolu 51,9 g PU + 0,5 ml roztoku jódu

Vzorek 1NH: roztok PU + HI-6..... 49,7 g PU + 0,018 g HI-6

Vzorek	1NJ				Průměrné hodnoty	Směrodatná odchylka
Část	A	B	C			
Plošná hmotnost [g/m ²]	1,24	1,36	2,68		1,76	0,799
Efektivita [%]	93,19	97,58	99,21		96,66	3,114
Tlak [Pa]	241	311	747		433	274,175
Vzorek	1NH					
Část	A	B	C	**		
Plošná hmotnost [g/m ²]	1,32	3,2	1,6	3,64	2,04	1,014
Efektivita [%]	92,32	92,18	92,14	99,31	92,21	0,095
Tlak [Pa]	207	234	247	752	229,33	20,404

Tab.9: Výsledky měření plošných hmotností a filtračních vlastností vzorku 1NJ a 1NH

** neuvažuji při výpočtu průměrné hodnoty a směrodatné odchylky

vzorek	část	1NJ	1NH
Velikost průměru D max.póru[μm]	A	101	130
	B	114	152
	C	182	60,8
Průměrné hodnoty velikostí pórů [μm]		132,33	114,27
Směrodatná odchylka velikosti pórů		43,5	47,6

Tab.10: Výsledky výpočtu velikostí průměrů max.pórů

7.4.1 Diskuze

V této části experimentu nás zajímalo, zda-li polymer s obsahem aktivních látek půjde elektrostaticky zvláknit a jestli obsah aktivních látek neovlivní zvláknovací proces. Ukázalo se, že nebyl patrný rozdíl mezi zvláknováním samotného polymeru a polymeru s aktivními látkami a že filtrační vlastnosti vzorku 1NJ a 1NH nebyly přidavkem aktivních látek ovlivněny. Tato část je pouze počátkem experimentu, o kterém by mohla pojednávat celá diplomová práce.

8 Závěr

V této práci se nám podařilo vyrobit vzorky nanovlákných vrstev mající přibližně stejnou plošnou hmotnost a různé počty nánosů. Jednoznačně se nepotvrdil náš předpoklad, že nanovlákné vrstvy vyrobené několika nánosy budou mít lepší filtrační vlastnosti než vrstvy vyrobené jedním nánosem. Průměrné hodnoty efektivit a velikosti pórů jednotlivých vzorků se významně neliší, proto nelze jednoznačně říct, který vzorek by byl teoreticky nejlepším filtrem.

Vypočítané a naměřené hodnoty průměrných velikostí pórů našich vzorků se významně neliší, a proto můžeme konstatovat, že teoretický výpočet velikosti pórů se zdá být relativně použitelný pro případnou náhradu měření velikosti pórů.

Pokud srovnáme vypočítané a naměřené hodnoty velikostí průměrných pórů s průměrnými hodnotami efektivit vzdušné filtrace (tab. 4), můžeme konstatovat, že vzorky se vyznačují průměrnými póry menších rozměrů než je střední velikost zachytávaných částic při vzduchové filtraci. To je zásadní pro úspěšnou filtraci. U vzorků je ale patrná značná hmotová nestejnoměrnost, která nepřímo vyplývá z velkého rozdílu mezi velikostí maximálního a průměrného póru. Hmotová nestejnoměrnost negativně ovlivňuje proces filtrace.

Při pokusu zvláknit polymer s obsahem aktivních látek se ukázalo, že nebyl patrný rozdíl mezi zvlákněním samotného polymeru a polymeru s aktivními látkami a že filtrační vlastnosti vzorků s aktivními látkami nebyly ovlivněny.

Tento experiment byl pouze počátkem možného dalšího zkoumání problematiky nanovlákných filtrů.

9 Použitá literatura

- [1] ELMARCO. *NANOFORLIFE* [online]. 2008 [cit. 2009-05-12]. Dostupný z WWW: <download.mpo.cz/get/34480/39088/450686/priloha004.pdf>.
- [2] Gate2Biotech [online]. 2006 , 9.6.2006 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.gate2biotech.cz/co-jsou-nanotechnologie/>>.
- [3] HRŮZA, J. Přednáška : Filtrace a filtrační materiály. *Filtrace* [online]. 2005 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/filtr.pdf>>.
- [4] Katedra netkaných textilií : Stránka předmětu materiálové inženýrství-návody na cvičení. *Měření maximální velikosti pórů bublinkovou metodou* [online]. 2005 [cit. 2009-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nove/dokumenty/podklady/mit/mit8.pdf>>.
- [5] KOŠŤÁKOVÁ, E. 1.přednáška : Úvod do nanomateriálů a nanotechnologie, úvod do textilních nanomateriálů. *Textilní nanomateriály* [online]. 2007-2008 [cit. 2009-02-21]. Dostupný z WWW: <http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nanotex/predn%C3%A1%C5%A1ka%201_uvod_do_nanomaterialu_na%20web.pdf>.
- [6] KRULA, Martin. *Obrazová analýza-Lucia* [online]. Technická univerzita v Liberci, Katedra textilních materiálů : 2007 [cit. 2009-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.ft.tul.cz/depart/ktt/pristroje/lucia/lucia.html>>.
- [7] MARTINOVÁ, L. Průvodce studiem netkaných textilií : Studijní text pro distanční vzdělávání. *Modelové příklady výpočtů ze cvičení pro NT* [online]. 2003 [cit. 2009-05-06]. Dostupný z WWW: <<https://skripta.ft.tul.cz/akreditace/data/2006-04-07/12-36-42.pdf>>.
- [8] MEGA a.s. : *Membránové procesy-elektrodialýza (ED)* [online]. 2006 [cit. 2009-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.mega.cz/elektrodialyza.html>>.
- [9] MOUDRÁ , Lenka. *Ambivalence nanotechnologie*. Brno, 2006. 99 s. MASARYKOVA UNIVERZITA V BRNĚ. Vedoucí diplomové práce Lorenz Michal PhDr. Dostupný z WWW: <http://is.muni.cz/th/65060/ff_m/Moudra_Lenka_-_Ambivalence_Nanotechnologie.txt>.

- [10] Nanovlákná včera, dnes a v budoucnu. *Technický týdeník* [online]. 2008, č. 1/2008 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3655&mark=Nanovl%E1kn a%20v%E8era,%20dnes%20a%20v%20budoucnu>>.
- [11] Neckar B., Ibrahim S. : Theoretical approach for determining pore characteristics between fibers. *Textile Research Journal*, Vol. 73, No. 7, page 611-619 (2003)
- [12] PALATÝ, Zdeněk, ŽÁKOVÁ, Alena. Sepační procesy : Difuzní dialýza. *CHEMagazín* [online]. 2002, roč. 12, č. 4 [cit. 2009-05-14]. Dostupný z WWW: <http://www.chemagazin.cz/Texty/CHXII_4_c11.pdf>.
- [13] PŘIDAL, Jaroslav. Separační membrány a jejich průmyslové použití : Dnešní trendy a vybrané moderní aplikace. *Chem.listy* 93 [online]. 1999 [cit. 2009-05-12], s. 432-440. Dostupný z WWW: <http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1999_07_432-440.pdf>.
- [14] *Rtuťová porozimetrie, Laboratorní práce č.9* [online]. Vysoká Škola Chemicko-Technologická v Praze, Ústav anorganické technologie : 2006 [cit. 2009-05-14]. Dostupný z WWW: <http://www.vscht.cz/kat/download/lab09_porozimetrie.pdf>.
- [15] ŠIDLOF, Petr, et al. Výzkumná zpráva : Vizualizace a měření proudění přes nanovláknenné filtry pomocí laserových metod. *Studie proveditelnosti*. 2008, č. TUI 2008, s. 1-20.
- [16] WAKEMAN, R. J. and Tarleton, E.S. Filtration: Equipment Selection, Modelling and Process Simulation. Oxford OX5 1GB, Elsevier Science Ltd, 1999.
- [17] *WIKIPEDIE otevřená encyklopedie* [online]. 2001 , 9.3.2009 [cit. 2009-03-23]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Filtrace>>.
- [18] *WIKIPEDIE otevřená encyklopedie* [online]. 2001 , 16.1.2009 [cit. 2009-03-16]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Technologie_Nanospider>.
- [19] *WIKIPEDIE otevřená encyklopedie* [online]. 2001 , 12.2.2009 [cit. 2009-05-12]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Reverzní_osmóza>.
- [20] ASTM F 316-03. Standard Test Methods for Pore Size Characteristics of Membrane Filters by Bubble Point and Mean Flow Pore Test. American Standard, ASTM International 2005

Příloha 1, konfokální mikroskop - obrázky



Obr.1: Nanovrstva vzorek 1N



Obr.2: Nanovrstva vzorek 4N